

底充胶导热系数预测及对倒装焊温度场的影响

马孝松^{1,2}, 陈建军¹

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院 陕西 西安 710071;
2. 桂林电子工业学院 机电与交通系 广西 桂林 541004)

摘要: 根据导热的基本理论和 Haiying Li 的研究数据拟合出填充了碳纤维、Silica 的环氧树脂封装材料的导热系数预测公式, 依此公式可预测出相关复合材料的导热系数. 利用有限元方法对电子封装倒装焊中不同导热系数的底充胶材料对温度场的影响进行了分析比较. 表明高导热系数的底充胶可明显降低在芯片和基板之间的温度差, 降低底充胶的热应力, 进而提高电子封装的可靠性.

关键词: 导热系数; 微电子封装; 复合材料; 底充胶; 倒装焊

中图分类号: TN605; TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-240X(2006)01-0103-04

Thermal conductivity prediction of underfill and its affects on the flip chip temperature field

MA Xiao-song^{1,2}, CHEN Jian-jun¹

(1. School of Mechano-electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;
2. Guilin Univ. of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: According to the thermal conductivity theory and Haiying Li's researching data, a prediction formula, which can be used to predicate the thermal conductivity of carbon fiber, silica and epoxy mixed packaging composite, is obtained. Finite element analysis is used to compare temperature differences between low and high thermal conductivity of composites. And research shows that high thermal conductivity composite can decrease the temperature difference of underfill between chip and substrate, so that it can improve the temperature distribution of the flip chip, decrease the thermal stress of underfill and increase packaging reliability.

Key Words: thermal conductivity; micro-electronic packaging; composite epoxy; underfill; flip chip

倒装焊技术目前被广泛地应用于高密度微电子产品的组装与封装, 尤其是在移动的电子设备中. 随着组装的密度越来越高, 电子设备的热可靠性问题越来越突出^[1]. 在电子封装的倒装焊中, 由于芯片与基板之间的热膨胀系数不匹配, 往往使用底充胶来降低焊接部位由于热循环产生的热应力, 进而达到提高封装可靠性的目的. 倒装焊技术采用 PbSn 焊球作为互连媒介, 将焊球直接做在芯片(IC)上, 在封装衬底(SUBSTRATE)上制作出相应的焊接盘, 芯片工作面向下将焊球与衬底焊对准后, 通过再流焊完成. 图1为倒装焊结构示意图, 焊球的作用是直接完成芯片与封装之间的电连接. 与线焊技术和载带焊技术相比, 倒装焊技术省略了引线的过渡, 实现了芯片与封装间最短的电连接通路, 具有卓越的电气性能. 另外, 芯片电极焊接点除边缘分布外还可设计成阵列分布, 具有相当高的 I/O 数目及封装密度.

然而, 由于芯片工作时或受外界热循环时, 同时会使封装部分受热, 而由于芯片和基板的导热系数很低, 加上芯片发热在封装的内部, 若温度场分布不均匀, 势必会造成焊点或者底充胶本身与芯片、基板粘结处热应力的不均匀变化, 导致焊点或粘结面疲劳失效. 因此, 寻找一种高导热系数的材料填充在基板和芯片之间,

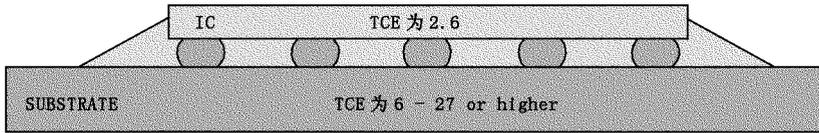


图 1 倒装焊结构示意图

既可改善温度场的分布,又可降低焊点的应力和保护焊点不受外界的侵害。

1 常用的底充胶材料

作为微电子封装材料,其导热系数是一个重要的参数.表 1 给出了常见的封装材料的导热系数^[2].目前,封装通常采用的是环氧树脂填充二氧化硅(Silica)的复合材料,它的导热系数低,不利于散热.文[3]工作表明,除添加 Silica 外再加碳纤维,可大大提高封装材料的导热系数.

表 1 常用的封装材料的导热系数

材 料	导热系数/(W·mK ⁻¹)	材 料	导热系数/(W·mK ⁻¹)
SiC 碳化硅	270.00	BN 氮化硼	600.00
Silica 二氧化硅	1.50	金刚石(高压)	2000.00
AlN 氮化铝	230.00	聚酰亚胺	0.20
碳纤维	880.00	环氧树脂	0.23

2 导热系数的预测

2.1 复合材料导热系数的基本方程

复合材料的导热系数不仅与其组成各相的导热系数有关,而且还与各相的相对含量、形态、分布以及相互作用等有关.如果复合材料呈如平行板式串联或并联分布,则可借助电学中将电导率串、并联求电路总电导率的方法,准确地求出复合材料的导热系数^[4,5].当热流方向与平行板的平面平行时,相当于“并联电路”.因此平行板总的导热系数 λ_c 为

$$\lambda_c = V_1 \lambda_1 + V_2 \lambda_2 \quad (1)$$

式中 V_1 和 V_2 分别为各层材料所占的体积百分数, λ_1 和 λ_2 分别为各层材料的导热系数.

此时,平行板总的导热系数 λ_c 主要由导热系数较高的层来决定.而当热流方向与平行板的平面垂直时,相当于“串联电路”,通过平行板内每一层的热流相等,但温度梯度不等,则平行板总的导热系数 λ_c 为

$$1/\lambda_c = V_1/\lambda_1 + V_2/\lambda_2 \quad (2)$$

这时,平行板总的导热系数 λ_c 主要由导热系数较低的层来决定.然而,这种平行板式分布在复合材料中毕竟是少数,更多的则为一相随机地分布在另一相之中的复合材料.倒装焊中的底充胶,正是由环氧树脂/Silica/碳纤维三者构成的复合材料,它们的粒子和纤维随机均匀地分布在环氧树脂基体中.碳纤维由 BAAmoco 化学公司提供,直径为 $7\mu\text{m}$,长度为 $45\mu\text{m}$,导热系数为 800 W/mK . Silica 是由日本化学工业公司生产的,平均直径为 $3\mu\text{m}$,导热系数为 1.5 W/mK .这里将对这类更具普遍意义相随机分布的复合材料的导热系数进行预测研究.

2.2 复合材料导热系数的改进方程

Maxwell 在基于分散相为球形粒子、且粒子之间的距离足够远而没有相互作用的条件下,推导出球形粒子随机分布在连续基体中的复合体系的导热系数 λ_c ,即 Maxwell 方程为^[6]

$$\lambda_c = \lambda_1 [(\lambda_2 + 2\lambda_1 + 2V_2(\lambda_2 - \lambda_1)) / (\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2V_2(\lambda_2 - \lambda_1))] \quad (3)$$

式中 λ_1 和 λ_2 分别为连续相基体和分散相粒子的导热系数, V_2 为分散相粒子的体积百分数.

Bruggeman 认为^[7],对高含量粒子复合材料的导热系数计算,可将相邻粒子的作用通过逐渐增加分散粒子数的方法来解决.对每一次增加极少粒子量 dV ,有 Maxwell 方程的微分形式为

$$d\lambda = 3\lambda (dV[\lambda_2 - \lambda] / ((1 - V)[\lambda_2 + 2\lambda])) \quad (4)$$

对于粒子含量为 V_2 的体系,对式(4)进行积分

$$\int \frac{[\lambda_2 + 2\lambda]d\lambda}{[\lambda_2 - \lambda]\lambda} = \int \frac{3 dV}{1 - V} \quad (5)$$

从而得到高含量粒子复合材料导热系数的 Bruggeman 方程^[6]为

$$(1 - V_2)^3 = (\lambda_1/\lambda_c) \chi (\lambda_c - \lambda_2)(\lambda_1 - \lambda_2)^3 \quad (6)$$

方程(6)又称为 Cheng-Vachon 模型. Cheng-Vachon 在基于概率统计模型的基础上,又得如下修正的模型^[8]

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1 - B}{\lambda_1} + \frac{1}{\{\alpha[\lambda_2 - \lambda_1] \lambda_1 + B(\lambda_2 - \lambda_1)\}^{1/2}} \times \frac{\ln \frac{[\lambda_1 + B(\lambda_2 - \lambda_1)]^{1/2} + (B/2) \alpha[\lambda_2 - \lambda_1]^{1/2}}{[\lambda_1 + B(\lambda_2 - \lambda_1)]^{1/2} - (B/2) \alpha[\lambda_2 - \lambda_1]^{1/2}}}{\quad} \quad (7)$$

其中 $B = |3V/2|^{1/2}$, $C = |2/(3V)|^{1/2}$.

对于两相复合材料,当连续相的热导率远小于非连续相的热导率时,即 $\lambda_2 \gg \lambda_1$,只要 $V < 0.667$,则复合体系的热导率可用以下的简化公式来计算: $\lambda \approx \lambda_1(1 - B)$. (8)

2.3 纤维填料的热导率模型

Rayleigh^[6]分析了垂直于纤维方向上的热障对体系导热性的影响,推导出了纤维填充量与体系导热率之间的关系为

$$\lambda_c = \lambda_1 |1 - 2V(\gamma + V - C_1 V^2/\gamma - C_2 V^2/\gamma)| \quad (9)$$

式中 $C_1 = 0.3058$, $C_2 = 0.0134$, $\gamma = ((\lambda_1/\lambda_2) + 1)((\lambda_1/\lambda_2) - 1)$.

3 高导热纤维、颗粒共填充的聚合物基复合材料导热模型

前人对单独填充颗粒状和纤维状填充物的聚合物复合基材料的导热系数均进行了研究,但对由颗粒状和纤维状共填充聚合物基复合材料的导热系数模型则尚无讨论.文[3]为满足电子封装底充胶高效热传导和高强度的要求,对填充了二氧化硅和碳纤维的环氧树脂底充胶进行了研究,通过对填充了碳纤维和二氧化硅与仅填充二氧化硅的高聚物进行了比较分析,结果显示前者的导热系数比通常使用的后者提高了 3~5 倍,这种有效的散热性对电子产品的性能和可靠性是至关重要的.这里基于前人的研究工作,针对 Cheng-Vachon 公式加以研究. Cheng-Vachon 公式的特点是它不仅适合于颗粒状的填充物,也适合于纤维状的填充物.但根据文[3]对同一种基下,关于颗粒和纤维状的导热系数的研究发现,碳纤维对导热系数的提高随着碳纤维填充量的不同其影响的效果而改变,且碳纤维对导热系数的影响要大大高于颗粒状高导热材料对导热系数的影响.在保持总体积百分比量不变的情况下,同时加入碳纤维和颗粒状填充物要比分别加入它们对导热系数的提高影响更显著.文[3]研究实验所用材料的导热系数如表 1.将文[3]填料比例数据仅加 Silica 或仅加碳纤代入公式(8)分别计算得到的值与表 2 中 Haiying Li 测量值进行了比较,结果见表 2 中 $|\Delta|$.

表 2 λ 的计算值与测量值的结果比较

填料体积/%	仅加 Silica 时			仅加碳纤时			共加碳/Silica 时 λ 测量值
	λ 测量值	λ 计算	$ \Delta $	λ 测量值	λ 计算	$ \Delta $	
0.0	0.200	0.200	0.000	0.20	0.200	0.000	1.00
7.5	0.233	0.235	0.002	0.35	0.235	0.115	1.50
15.0	0.266	0.380	0.114	0.65	0.380	0.654	2.44
22.5	0.299	0.477	0.178	1.25	0.477	0.773	4.18
30.0	0.332	0.608	0.276	1.65	0.608	1.042	4.96
37.5	0.365	0.800	0.435	1.85	0.800	1.050	5.05
45.0	0.400	1.121	0.721	1.90	1.121	0.799	4.75

由表 2 的结果可见 (1)公式(8)对颗粒填充类的导热系数估计过高,且随着填量的增加,估计值偏差越大.因此必须对此式加以修正 (2)公式(8)对纤维填充类的导热系数估计过低,且随着填量的增加,估计值偏小,但在碳纤维含量在 30%~37.5% 范围内偏差值趋于平稳,因此也需要对此式加以修正 (3)碳纤维对聚

合物导热系数的影响程度远大于 Silica 颗粒,但单独填加又没有一起填加导热系数高,(4)碳/Silica 在填充物于 22.5% ~ 45% 时其导热系数趋于平稳,其值约在 5 左右。

基于上述分析,根据公式(7)中 B 值的形式,对公式(8)进行如下修正:

$$\lambda = C\lambda_1 / (1 - B) \quad (10)$$

式中 $B = |(5V_2 + V_3)/3|^{1/2}$, V_2, V_3 分别为二氧化硅和碳纤维体积百分含量, $C = 2.75$ 为修正系数。这里的 B, C 两系数是根据 Haiying Li 测量数据即表 2 中 Silica/碳纤维共填数据以偏差最小拟合得到的结果。

从文中测量值与预测值的比较结果来看,偏差均值为 0.16 相对误差约 9%,可见结果是比较粗糙的。根据文[8]的建议,结合文中使用不同量的微粒和纤维填料,考虑到量和类型,采用将式(3)与(9)的结合模型为

$$\lambda_c = \lambda_1 C \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2V_2(\lambda_2 - \lambda_1)}{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2V_2(\lambda_2 - \lambda_1)} \left| 1 - \frac{2V_3}{\gamma + V_3 - C_1 V_3^2/\gamma - C_2 V_3^2/\gamma} \right| \quad (11)$$

其中 V_2, V_3 分别为微粒和纤维填料的体积百分比,其余参数同式(9)模式; C 为所求的修正值,这是由于 Rayleigh 模型的使用条件与本研究的条件存在着差异,因此必须根据实验加以修正。

4 不同导热系数的底充胶对温度场的影响

为了比较导热系数不同的底充胶对倒装焊温度场分布的影响,利用有限单元法对填充了底充胶倒装焊部分的温度场进行了多次数据模拟。图 2 为底充胶倒装焊部分的有限元离散图,图 3 为焊点及两焊点中心线附近结点局部示意图。利用 Ansys 有限元分析软件计算获得了焊点附近处时变温度场的分布。表 3 列出了高导热和低导热底充胶对焊点间对称线上不同结点在不同时刻温度的分布情况。从给出的两焊点之间对称线上的结点的温度分布可见,不同导热系数的底充胶对焊点温度分布的影响很大。

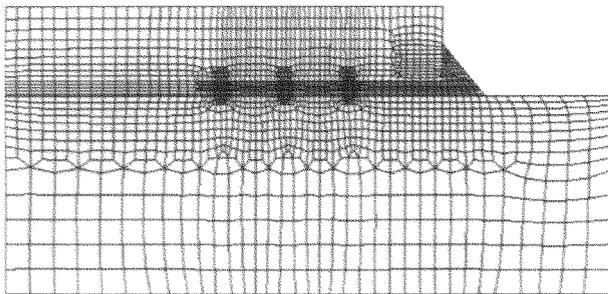


图 2 倒装焊有限元模型

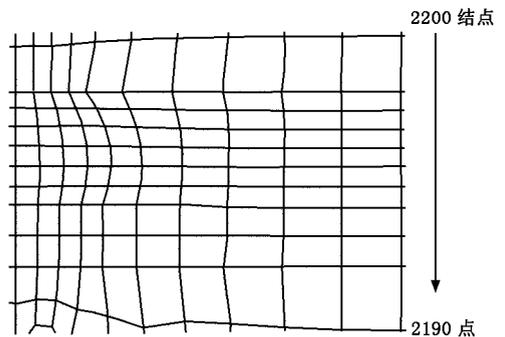


图 3 焊点及两焊点中心结点局部图

表 3 高导热底充胶和低导热底充胶对焊点间温度分布影响

两焊点间对称中心线上结点号	第 13 个时间步长结点温度/°C		第 15 个时间步长结点温度/°C		第 17 个时间步长结点温度/°C	
	低导热底充胶	高导热底充胶	低导热底充胶	高导热底充胶	低导热底充胶	高导热底充胶
2200	94.9	94.9	106.0	106.3	110.5	110.5
2199	101.2	101.2	112.0	112.2	116.2	116.2
2198	108.4	108.3	118.3	118.2	121.9	121.9
2197	116.1	115.9	124.5	124.4	127.6	127.5
2196	124.2	124.0	130.1	130.7	133.3	133.3
2195	132.8	132.5	137.2	137.1	138.9	138.9
2194	55.5	75.9	72.6	93.5	135.9	136.1
2193	31.2	44.7	40.7	61.8	134.2	133.2
2192	26.1	31.6	29.4	42.7	132.5	130.1
2191	25.1	26.9	26.1	32.5	130.5	126.7
2190	25.0	25.3	25.1	27.1	127.4	123.1

