

SMT 激光低温钎焊接合部热过程的数值模型*

王春青 钱乙余 姜以宏

(哈尔滨工业大学焊接教研室, 哈尔滨 150006)

提要 本文在实验与分析的基础上,建立了表面组装激光低温钎焊接合部温度场数值计算模型,考虑了钎料的热物理性质变化、激光的实际能量分布和在钎焊材料表面的反射损失以及表面散热对热过程的影响,试验验证了该模型的正确性。

关键词 激光低温钎焊,热过程,数值模型,表面组装

A numerical simulation model of SMT laser microsolder thermal process

Wang Chunqing, Qian Yiyu, Jiang Yihong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

Abstract In this paper, a numerical simulation of thermal process on the SMT laser microsoldering joint has been developed, in which, the influence on thermal process of the factors such as the thermal conductivity, variation of solder with temperature, light reflection coefficient of the lead wire surface, and heat exchange on the surface of SMT materials have all been considered. In order to carry this numerical calculation practice and prove it's results, the reflexive characteristic of light wave to the SMT materials has been gauged temperature process of laser microjoint has been measured.

Key words laser microsoldering, thermal process, numerical calculation, surface mount technology (SMT)

1 序 言

表面组装(SMT—Surface Mount Technology)是 80 年代后期出现的新型电子器件高密度组装技术,与插孔式组装方法相比,组装密度可提高 3 倍以上,对于电子产品的高可靠性、轻量化及小型化都具有重要作用。在 SMT 中,激光低温钎焊被认为是最为适合高密度表面组装的一种高可靠性连接技术,而受到广泛的重视,目前许多国家都在进行这方面的研究与开发工作。

收稿日期:1991 年 5 月 8 日;收到修改稿日期:1991 年 6 月 24 日。

*本研究得到国家自然科学基金资助。

热过程是研究 SMT 激光低温钎焊接合部的形成及相应物理化学和冶金过程的基础。但是由于加热过程时间极短(小于 1 s),同时,接合部的尺寸微小、形状与结构复杂,接合面的温度场实测非常困难。本文介绍了通过数值计算研究 SMT 激光低温钎焊热过程的方法及结果,在此模型中,考虑了各主要因素对热过程的影响,因此更为接近过程的实际。

2 设备与材料

采用了自行研制的 SMT 激光低温钎焊设备。其中,激光器采用连续输出的 YAG 固体激光器,波长 $1.06 \mu\text{m}$,最大输出功率为 50 W,由微型计算机对激光器电源直接控制,以满足微接合过程对激光加热能量高精度的要求。

本文选用了两种材料的基板: Al_2O_3 陶瓷基板(Al_2O_3 Ceramic Substrate)与玻璃树脂印制电路板(Resin PCB),厚度均为 0.82 mm。基板上导体分别为 Ag-Pd 厚膜导体与 Cu 导体。器件引线为 Cu 合金,表面为 Sn-Pb 合金镀层,引线的厚度 \times 宽度 $=0.15\times 0.4 \text{ mm}^2$ 。钎料采用膏状 Sn-Pb 共晶钎料,其中钎剂含量 12%,印刷厚度 0.2 mm。材料的热物理性质列于表 1。由于在 $0\sim 300^\circ\text{C}$ 的加热范围内,各值的变化不大,因此取此区间内的平均值。

Sn-Pb 钎料的导热系数是温度的函数,且变化幅度较大,因为在加热过程中要发生钎剂成分的挥发,钎料合金由于熔化、凝聚,由分散的粉末状态变成为连续体,必须作为变量处理,才可保证数值计算的精度。在未达到钎料熔点以前($T < 180^\circ\text{C}$),将膏状钎料看作为多孔介质,由混合物的导热系数计算方法^[1],得到不同温度下的膏状钎料导热系数,为在程序中使用方便,将导热系数与温度的关系拟合为直线方程,如下式所示:

$$k = 0.3055T - 4.99 \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 180^\circ\text{C}) \quad (1)$$

而当钎料熔化后,其导热系数即为 Sn-Pb 合金的值。

3 数值计算模型

3.1 导热微分方程

可将 SMT 激光低温钎焊接合部简化为如图 1 所示的结构。激光光束垂直照射于引线的上表面,一部分能量被表面反射回来,而另一部分被表面吸收转换为热能,通过热传导加热引线、钎料和基板。钎料熔化,与引线和基板上导体相互作用,凝固后形成微接合部。

激光加热的功率与加热时间通过工艺试验确定,其范围为 $5\sim 25 \text{ W}$ 和 $0.05\sim 1 \text{ s}$ 。激光光斑直径应与引线宽度基本一致,本文中均为 $\phi 0.4 \text{ mm}$ 。

在钎焊的加热过程中,钎料要发生固-液相变和在引线与基板之间的流动,但考虑到钎料量与基板体积相比要小得多,为简化部分计算,忽略了钎料的熔化潜热与对流换热的影响。

Table 1

Materials	ρC ($10^6 \text{ J/m}^2\text{K}$)	k (W/mK)
Cu 引线	3.5	154.9
Al_2O_3	4	50
玻璃树脂	2	0.4
Sn-Pb 合金	1.97	50

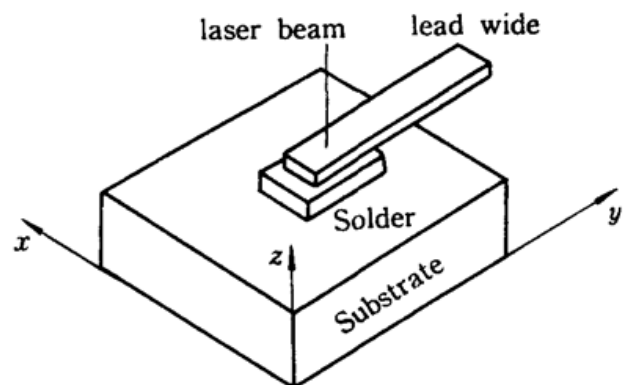


Fig. 1 Numerical calculation model of thermal process of laser micro-soldering

由热传导理论,可导出热传导方程如下:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (2)$$

其中, ρC 为材料的热容, k 为导热系数, $T, t, (x, y, z)$ 分别为温度、时间与位置坐标。

对引线、基板和钎料,参数 ρC 与 k 取相应不同的值。同时对于引线与基板材料,其导热系数 k 与热容量 ρC 随温度的变化很小,可视为常数,上式可化为常系数微分方程:

$$\text{令 } a = k/\rho C \quad \frac{\partial T}{\partial t} - a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (3)$$

而对于钎料,由于在加热温度范围内 k 的变化很大,必须作为变数。

3.2 边界与界面条件

激光光束照射于引线表面,由于其趋肤深度与引线的厚度相比极小,可将其产生的热源作为表面热源处理,同时考虑了表面与周围空气之间的对流换热,设 $q(x, y)$ 为引线表面的热流分布。在引线上表面,边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{h}{k} [T(x, y, 0, t) - T_0] + q(x, y)/k \quad (4)$$

式中 T_0 为环境温度; h 是表面对流换热系数,本文中取空气自然对流时的数值 $h = 12$ (W/mK)。

设 q_0 为激光总功率,光束斑点半径为 w ,热流分布可表示为

$$q(x, y) = \frac{2Aq_0}{\pi w^2} \exp(-2r^2/w^2) \quad (5)$$

式中 A 是表面吸收率,引线表面的 Sn-Pb 合金镀层对波长 $1.06 \mu\text{m}$ 的 YAG 激光的吸收率经用光谱仪实测为 0.79(未熔化表面 $T < 180^\circ\text{C}$) 和 0.74(熔化表面),因相差较小,取其平均值 $A = 0.765$ 。

在其表面只有自然对流换热项,边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial n} = - \frac{h}{k} (T_n - T_0) \quad (6)$$

n 为边界表面法线方向, T_n 为表面温度。

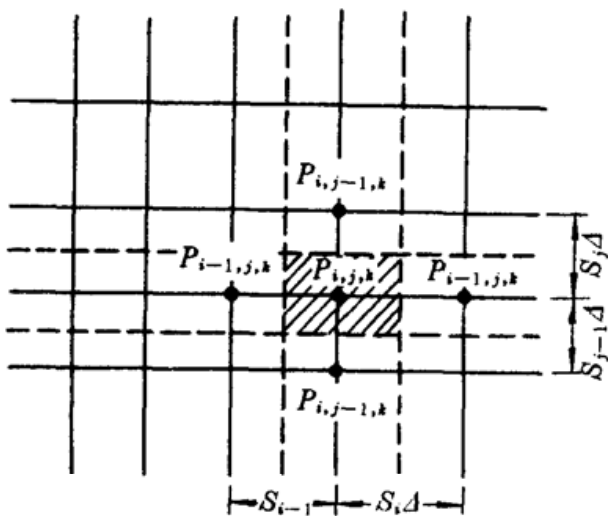


Fig. 2 Calculatuion cell inside of lead and substrate

引线与钎料、钎料与基板之间构成两个界面。由于膏状钎料的压敏性,在钎料未熔化前两个界面都可近似认为是理想接触;当钎料熔化后,与引线和基板上导体润湿,此时完全成为理想接触。即在任何时刻,都可认为界面上的温度和热流是连续的。

3.3 差分方程及网格划分

基板的尺寸远大于引线与钎料的尺寸,而且由于陶瓷基板的导热系数较大,必须将基板的考察范围取得足够大,以保证计算精度;但另一方面引线和钎料尺寸小,又处于激光加热斑点范围之内,温度的变化幅度必然很大,在其上必须取小的网格间距。若在整个空间上均取等间距划分,计算的结点数将非常巨大,在微型计算机上难以实现,在大型机上也将浪费存储单

元与计算时间。本文采用非等间距空间网格划分方法。在光斑直径内及附近温度梯度大的位置上采用较密集的网格间距,在基板及引线长度方向上温度梯度小的位置逐渐向外加大网格间距。这样即保证了模型的精度又加快了计算速度。图 2 为网格划分示意图。

差分方程采用显示差分形式。在引线及基板内部,方程为

$$T(i, j, k, n + 1) = T(i, j, k, n) + \frac{2k\Delta t}{\rho C \Delta^2} \left[\frac{T(i-1, j, k, n)}{S_{i-1}(S_{i-1} + S_i)} + \frac{T(i+1, j, k, n)}{S_i(S_{i-1} + S_i)} + \frac{T(i, j-1, k, n)}{S_{j-1}(S_{j-1} + S_j)} + \frac{T(i, j+1, k, n)}{S_j(S_{j-1} + S_j)} + \frac{T(i, j, k-1, n)}{S_{k-1}(S_{k-1} + S_k)} + \frac{T(i, j, k+1, n)}{S_k(S_{k-1} + S_k)} - \left(\frac{1}{S_i S_{i-1}} + \frac{1}{S_j S_{j-1}} + \frac{1}{S_k S_{k-1}} \right) T(i, j, k, n) \right] \quad (7)$$

式中 (i, j, k) 为空间网格坐标, n 为时间网格坐标, Δ 为等间距空间网格的长度, Δt 为时间步长。 S_i, S_j, S_k 分别为非等距网格在 x, y, z 方向上的长度与等间距网格长度之比, 如图 2 所示。

$$S_i = |P_{i+1, j, k} - P_{i, j, k}| / \Delta \quad (8-1)$$

$$S_j = |P_{i, j+1, k} - P_{i, j, k}| / \Delta \quad (8-2)$$

$$S_k = |P_{i, j, k+1} - P_{i, j, k}| / \Delta \quad (8-3)$$

在钎料内部空间网格全部取为均匀划分。但由于导热方程是变系数的, 差分方程与在基板及引线上的方程有较大的差别:

$$T(i, j, k, n + 1) = T(i, j, k, n) + \frac{\Delta t}{\rho C \Delta^2} [k_{s, i-1} T(i-1, j, k, n) + k_{s, i} T(i+1, j, k, n) + k_{s, j-1} T(i, j-1, k, n) + k_{s, j} T(i, j+1, k, n) + k_{s, k-1} T(i, j, k-1, n) + k_{s, k} T(i, j, k+1, n) - (k_{s, i-1} + k_{s, i} + k_{s, j-1} + k_{s, j} + k_{s, k-1} + k_{s, k}) T(i, j, k, n)] \quad (9)$$

式中

$$K_{si} = \{k_s [T(i+1, j, k, n)] + k_s [T(i, j, k, n)]\} / 2 \quad (10-1)$$

$$K_{sj} = \{k_s [T(i, j+1, k, n)] + k_s [T(i, j, k, n)]\} / 2 \quad (10-2)$$

$$K_{sk} = \{k_s [T(i, j, k+1, n)] + k_s [T(i, j, k, n)]\} / 2 \quad (10-3)$$

时间步长的选择主要根据显示差分的稳定性判据: $k\Delta / \rho C \Delta^2 < 1/6$ 。但考虑到边界散热条件, Δt 的值要比由此计算得到的值略小, 初步选定后再由试算进行调整。

3.4 程序的实现

数值计算程序采用 MS-FORTRAN 语言编制, 在 IBM-PC/AT 机上调试、运行成功。各给定时刻的温度场数据均保存在磁盘上, 以备后续的数据分析处理程序使用。程序还可输出任意给定时刻的某一截面上的等温线或温度分布, 给出 Auto CAD 软件的 DXF 格式数据文件, 以便绘图输出。

4 计算结果及试验验证

4.1 计算结果

图 3 为计算得到的基板表面上在某一加热时刻的温度场分布。很明显, 由于两种基板的导热系数相差很大, 表现在温度场的分布也有了很大的差别。在导热系数大的陶瓷基板上进行低温钎焊时, 要控制加热范围, 应该选择大功率、短时间的硬加热规范。

图 4 为沿激光光束轴线方向上的温度分布, 可知, 在钎料未熔化前, 其导热系数小, 在厚度

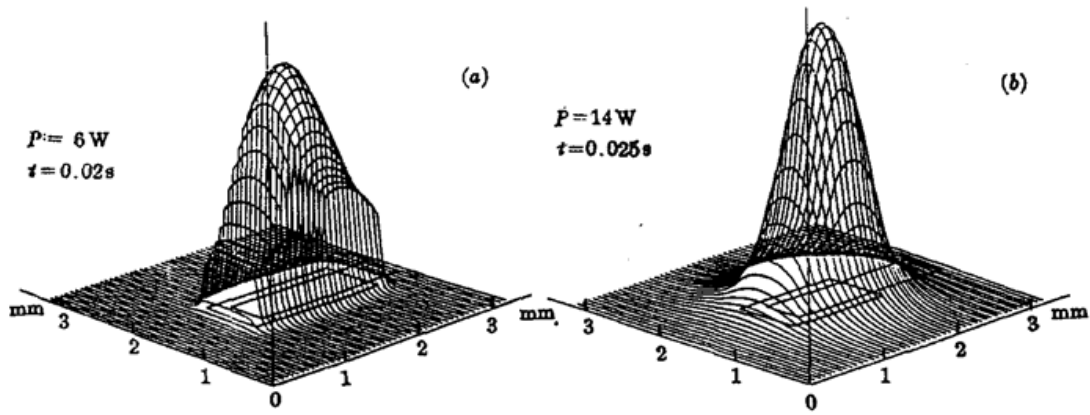


Fig. 3 Temperature distribution on the substrate surface

方向上存在较大的温度梯度。基板的导热系数越大,这一梯度的数值也越大。随着钎料的熔化,其导热系数增大到纯钎料合金的导热系数的数值,温度梯度相应减小。引线由于导热系数很大,在厚度上的温度梯度不大且很快达到稳定。

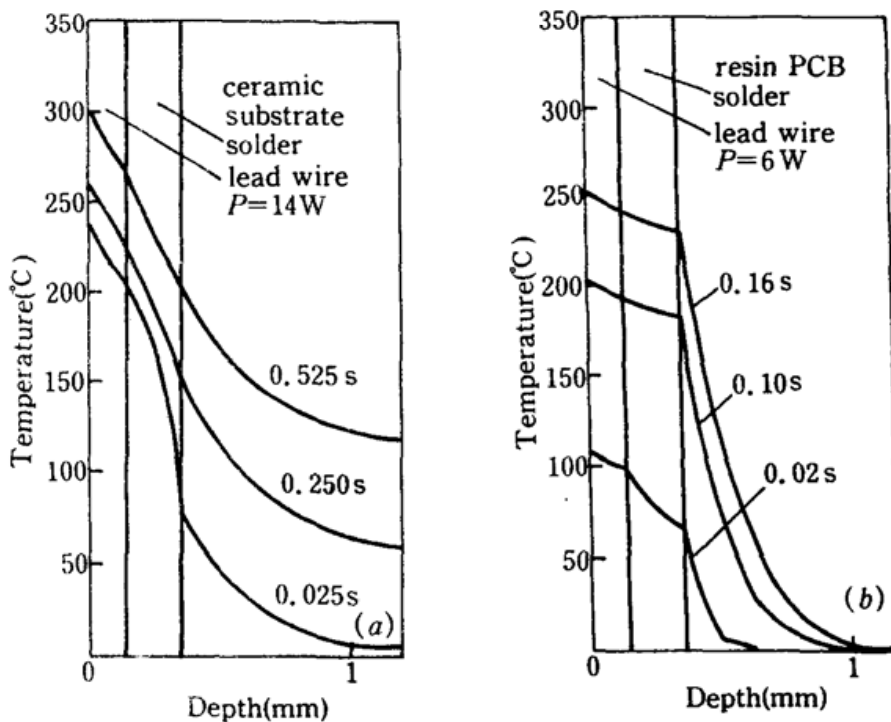


Fig. 4 Temperature distribution in laser beam's axis

4.2 试验验证

微电子器件高密度表面组装接合部由于尺寸极小,直接测量,如使用热电偶将严重影响接合部温度场的实际分布,测量误差很大。本文中,主要通过接合面积验证计算结果;同时利用作者所研究开发出的热电势接合界面温度测量的新方法^[2],对温度过程的计算结果进行验证。

厚膜导体的主要成分是 Ag,而引线的主要成分为 Cu,两者之间属于完全不同的金属材料,因此,可利用其接触热电势测量界面上的温度。

图 5 是接合界面温度测量方法的示意图, 其原理的详细讨论请参见文献[2]。

图 6 是接合界面上(钎料与基板上导体界面)的温度上升过程的数值计算与实测结果的比较。可以看到, 两者之间具有很好的一致性。

同时还比较了接合面积的计算结果与实测值, 如图 7 所示, 从另一方面证实了热过程数值计算模型的正确性。

接合面积的测量方法为: 由拉剪或剥离试验去掉引线, 得到破断面; 超声清洗后, 破断面经照像、复印放大, 在图形数字化仪上将其边缘曲线读入计算机, 计算得到实际的接合面积。

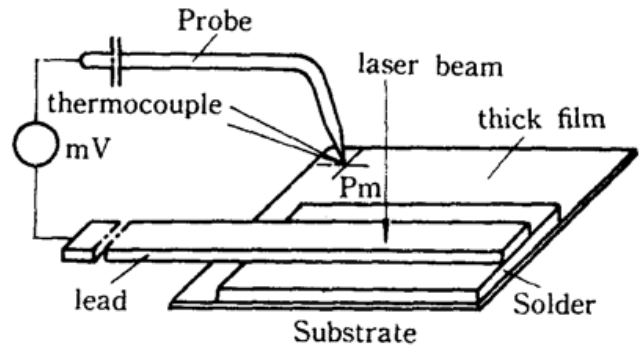


Fig. 5 Means of measuring temperature of interface between lead and conductor

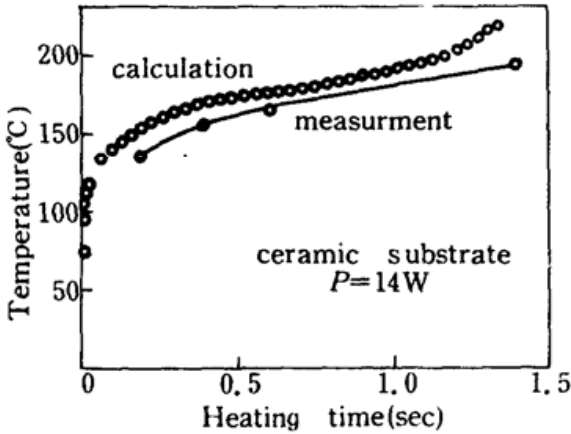


Fig. 6 Comparison of temperature between calculation and measurement in laser microsoldering joint

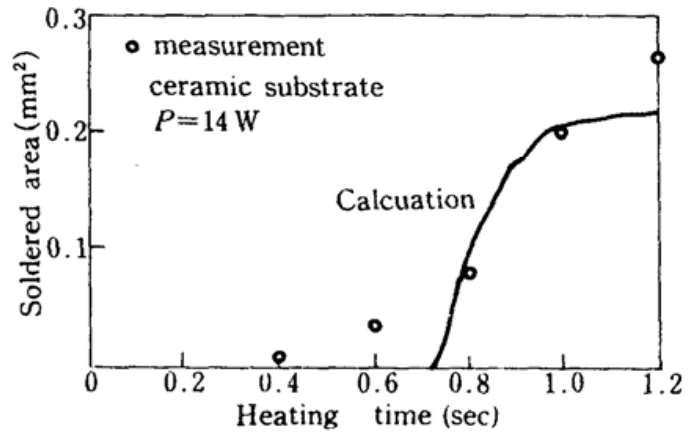


Fig. 7 Comparison of soldered area between calculation and measurement

参 考 文 献

- 1 化学工程手册(第一篇), 化学工业出版社, 1980年, 407
- 2 仲田周次, 王春青, 接合界面の温度測定方法の検討, (日本)溶接学会全国大会讲演概要, 第41集, 326, 1987年10月