文章编号：1004-0609(2010)06-1189-06

钎焊及时效过程中化学镀 Ni-P 与 Sn-3.5Ag 的界面反应

黄明亮[1,2]，柏冬梅[1,2]

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院，大连 116024；
2. 大连理工大学 辽宁省先进连接技术重点实验室，大连 116024)

摘　要：研究磷含量为 6.5%(质量分数)的化学镀 Ni-P 薄膜与 Sn-3.5Ag 钎料合金之间的润湿行为，以及 Sn-3.5Ag/Ni-P 焊点在钎焊和时效过程中的界面反应。结果表明：250 ℃时，直径为(2.3±0.06) mm 的 Sn-3.5Ag 焊球在化学镀 Ni-6.5%P 薄膜上钎焊后得到的润湿角约为 44°，铺展率约为 67%；焊点界面由 Ni_3Sn_4 IMC 层、及较薄的 Ni-Sn-P 过渡层构成 Ni_3P 晶化层；钎焊过程中界面 Ni_3Sn_4 IMC 的生长速率与钎焊时间 $t^{1/3}$ 呈线性关系；时效过程中界面 Ni_3Sn_4 IMC 及富 P 层的生长速率与时效时间 $t^{1/2}$ 呈线性关系。

关键词：化学镀 Ni-P 薄膜；Sn-3.5Ag 钎料；界面反应；钎焊；时效
中图分类号：TQ153.2　　**文献标志码**：A

Interfacial reactions between Sn-3.5Ag solder and electroless Ni-P during soldering and aging

HUANG Ming-liang[1,2], BAI Dong-mei[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Key Laboratory of Liaoning Advanced Welding and Joining Technology,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The wetting behavior of Sn-3.5Ag solder on the electroless Ni-P film with 6.5% P (mass fraction) during soldering and the interfacial reactions between Sn-3.5Ag solder and electroless Ni-6.5% P during soldering and aging were investigated. The results show that the wetting angle is about 44° and the spreading coefficient is about 67% using the solder balls with diameter of (2.3±0.06) mm at 25 ℃. The soldering interface are composed of a Ni_3Sn_4 IMC layer, a thinner Ni-Sn-P layer and a Ni_3P crystallization layer between Sn-3.5Ag solder and electroless Ni-P. The growth kinetics of the interfacial IMC Ni_3Sn_4 during soldering follows a linear relation with cubic root of soldering time. The growth kinetics of interfacial IMC Ni_3Sn_4 and P-enriched layer during aging obeys a linear relation with square root of aging time.

Key words: electroless Ni-P film; Sn-3.5Ag solder; interfacial reaction; soldering; aging

随着电子封装技术的发展，电子产品的集成度越来越高，焊点尺寸越来越小。焊点作为器件的连接材料，担负着机械、电路连接以及热交换等任务，其在服役过程中的可靠性也越来越受到关注[1]。微电子互连的可靠性依赖于多种因素，其中钎料合金/焊盘 UBM(Under bump metallization)界面反应所形成的金属间化合物(Intermetallic compound，IMC)对焊点可靠性的影响最为重要[2]。金属间化合物层的形成是构成可靠性机械连接的必要条件，而其在服役过程中的过快生长会降低焊点的热疲劳寿命和可靠性[3−4]。

基金项目：国家科技支撑计划资助项目(2006BAE03B02-2)；国家自然科学基金资助项目(U0734006，50811140338)；教育部高校博士点基金资助项目(20070141062)
收稿日期：2009-07-15；**修订日期**：2010-01-05
通信作者：黄明亮，教授，博士；电话：0411-84706595；E-mail：huang@dlut.edu.cn

Sn-3.5Ag 合金具有优异的力学性能，已在某些电子产品中获得广泛应用。Sn-3.5Ag 共晶温度为 221 ℃，远高于传统 Sn-Pb 合金的(183 ℃)，同时，Sn-3.5Ag 钎料中 Sn 含量也远高于传统 Sn-Pb 钎料中的 Sn 含量。高的钎焊温度和高的 Sn 含量使 Sn-3.5Ag 在钎焊过程中界面反应加快，生成的界面金属间化合物的种类、形态、生长速度也有很大差别。因此，高 Sn 含量的 Sn-3.5Ag 钎料在钎焊和服役过程中界面反应引起的可靠性问题成为研究者关注的热点。近年来，化学镀 Ni-P 作为优异的钎焊阻挡层材料，在微电子封装工业中得到广泛的应用[5−6]。化学镀 Ni-P 薄膜中含有一定的 P 元素，在钎焊和服役过程中，P 元素与 Ni、Sn 元素之间并不发生化学反应，导致界面上富 P 层的析出。此外，化学镀 Ni-P 是非晶薄膜，Ni-P 薄膜的成分对界面反应过程中焊点界面结构变化产生的影响比较复杂[7−9]。所以，研究化学镀 Ni-P 薄膜与 Sn-3.5Ag 合金之间的界面反应及其对焊点可靠性影响具有重要的意义。本文作者主要研究了 P 含量为 6.5%(质量分数)的化学镀 Ni-P 薄膜与 Sn-3.5Ag 焊球在钎焊和时效过程中的界面反应及界面 IMC 的生长规律。

1 实验

实验中将 L2 铝(w(Al)＞99.60%，w(Cu)≤0.05%，w(Mg)≤0.03%，w(Mn)≤0.03%，w(Fe)≤0.35%，w(Si)≤0.25%，w(Ti)≤0.03%，其他不大于 0.03%(质量分数)切割成 2 mm×1 mm×1.5 mm 的小片，预磨抛光后，进行化学镀 Ni-P 薄膜制备，经扫描电镜(SEM)测得 Ni-P 镀层厚度约 6 μm，能谱(EDX)测定其磷含量为 6.5%(质量分数)。将纯度 99.95%的 Sn 和 99.9%的 Ag 丝在 500 ℃的真空炉中熔炼 4 h 得到 Sn-3.5Ag 钎料合金，冷却后切割成质量为(48±1) mg 的小块，然后，熔化成直径为(2.3±0.06) mm 的焊球。

在 Sn-3.5Ag 焊球表面涂覆一层 RMA 钎剂，放置于化学镀 Ni-P 薄膜上，同时放入预先加热到 250 ℃的加热炉中，焊球融化时形始计时，反应时间分别为 5、10 和 30 min。将钎焊 5 和 30 min 的试样在 150 ℃的空气中时效，时效时间分别为 50，100，150 和 200 h。将钎焊及时效后的试样垂直放在直径 20 mm 的塑料管中，用环氧树脂进行冷镶嵌。对镶嵌好的样品进行预磨和抛光后，用 92%乙醇−5%硝酸−3%盐酸的溶液腐蚀，在扫描电镜下观察焊点横截面微观组织和生成的界面 IMC 晶粒的形貌。

2 结果与分析

2.1 Sn-3.5Ag 焊球在化学镀 Ni-P 薄膜上的钎焊润湿行为

钎焊过程中，钎料在母材表面上的润湿、流动对钎焊的成功与否起到关键的作用。对于润湿行为的表征，通常有两种方法：一是测量钎料的润湿角，二是测量钎料的铺展面积并用铺展系数来表征。

润湿角的大小由 Yung-Dupre 公式得到：

$$\cos\theta=\frac{\gamma_{SF}-\gamma_{IF}}{\gamma_{LF}} \tag{1}$$

式中：γ_{SF}、γ_{IF} 和 γ_{LF} 分别为基体/钎剂、IMC/钎料及钎料/钎剂之间的表面张力。从式(1)可以看出，当 γ_{SF} 较小或 $\gamma_{SF}-\gamma_{IF}$ 较大时，对应的润湿角较小，小的润湿角有利于钎料的钎接。

在液态下钎料在本身重力的作用下，在基体横向上会发生流动。表 1 所列为 Sn-3.5Ag/Ni-P 在 250 ℃钎焊不同时间的润湿角。由表 1 可以看出，润湿角的大小随着钎焊时间的延长而略有减小，总体上变化不大。测量得到的润湿角接近 44°，这与 MA 和 SUHLING 等[10]使用 W2000A 助焊剂在 Cu 板上得到的润湿角相近。

表 1 Sn-3.5Ag 与 Ni-P 薄膜钎焊的润湿角

Table 1 Wetting angle between Sn-3.5Ag and Ni-P plating

Soldering time/min	5	10	30
Wetting angle/(°)	45.0	44.2	44.1

对于铺展系数的测定，通过 GB/T 11364—2008 的试验方法进行，通过以下公式计算

$$K=(D-H)/D\times100\% \tag{2}$$

式中：K 为铺展系数；H 为钎料在基体表面铺展后的高度的数值(mm)；D 为与钎料体积相等的球体的直径(mm)，$D=1.24V^{1/2}$，V 为实验中使用的钎料的质量与密度的比值。

表 2 所列为 Sn-3.5Ag/Ni-6.5%(质量分数)P 在 250 ℃钎焊不同时间的铺展系数。由表 2 可以看出，铺展系数随着钎焊时间的延长略有增大，钎焊 30 min 后的铺展系数较钎焊 5 min 时的铺展系数增加 2%，但总体变化不大，铺展系数约为 67%，这与润湿角的测量结果基本一致。

表 2　Sn-3.5Ag 与 Ni-P 层钎焊的铺展系数

Table 2　Spreading coefficients between Sn-3.5Ag and Ni-P plating

Soldering time/min	*H*/mm	*K*/%
5	0.794	65.48
10	0.766	66.7
30	0.737	67.96

Density of Sn-3.5Ag is 7.5 g/cm^3.

2.2　钎焊过程中 Sn-3.5Ag/Ni-6.5P 的界面反应

图 1 所示为 Sn-3.5Ag 焊球与化学镀 Ni-6.5P 薄膜在 250 ℃下钎焊不同时间后界面 Ni_3Sn_4 IMC 的 SEM 像。从图 1 可以看出，钎焊 5 min 后，Ni_3Sn_4 IMC 主要呈现小颗粒状，同时有少量较粗大的条状晶粒；钎焊 10 min 后，Ni_3Sn_4 IMC 小颗粒长大，较粗大的条状晶粒也比钎焊 5 min 时多，且在 Ni_3Sn_4 IMC 表面附着一些细小颗粒，通过 EDX 确认为 Ag_3Sn 粒子；钎焊 30 min 后，粗大的棱面状颗粒成为 Ni_3Sn_4 IMC 的主要形貌特征，大块的 Ni_3Sn_4 晶粒尺寸约为 6 μm，同时 Ni_3Sn_4 表面附着的 Ag_3Sn 颗粒也有所增加，局部 Ag_3Sn 长成细条状。由此可见，钎焊过程中，界面 Ni_3Sn_4 金属间化合物的尺寸随着液态钎料与 Ni-P 薄膜反应时间延长而逐渐变大，而相应的晶粒数则减少。KIM 和 TU[11]研究认为，这种晶粒的粗化受从 UBM 到界面的扩散流及由于晶粒曲率半径不同引起的熟化流控制。从钎焊 5~10 min 的形貌可以看出，IMCs 的生长符合晶粒粗化机制。HE 等[12]研究认为，棱面状 Ni_3Sn_4 IMC 形成的主要原因是由于 Ni_3Sn_4 相存在界面能的各向异性。大的棱面状晶粒是由多个相邻具有相同结晶取向的晶粒粗化形成。在长时间的钎焊过程中，界面 Ni_3Sn_4 IMC 形成连线层，从 UBM 到界面的扩散流受到抑制，而熟化流控制了 Ni_3Sn_4 IMC 的生长，因此，形成了大的具有相同结晶取向的晶粒和不同结晶取向的小晶粒共存的形貌特征。

图 2 所示为 Sn-3.5Ag 焊球与化学镀 Ni-P 薄膜在 250 ℃钎焊不同时间的横截面的 SEM 像。扫描电镜

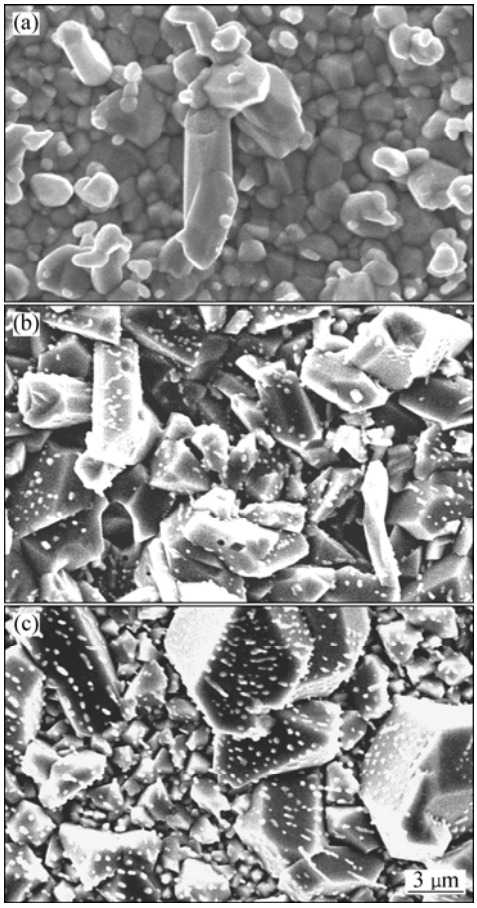

图 1　Sn-3.5Ag/Ni-6.5P 在 250℃钎焊不同时间后界面 Ni_3Sn_4 IMC 的 SEM 像

Fig.1　SEM images of Ni_3Sn_4 IMC at interface of Sn-3.5Ag/Ni-6.5P soldering at 250 ℃ for different times: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 30 min

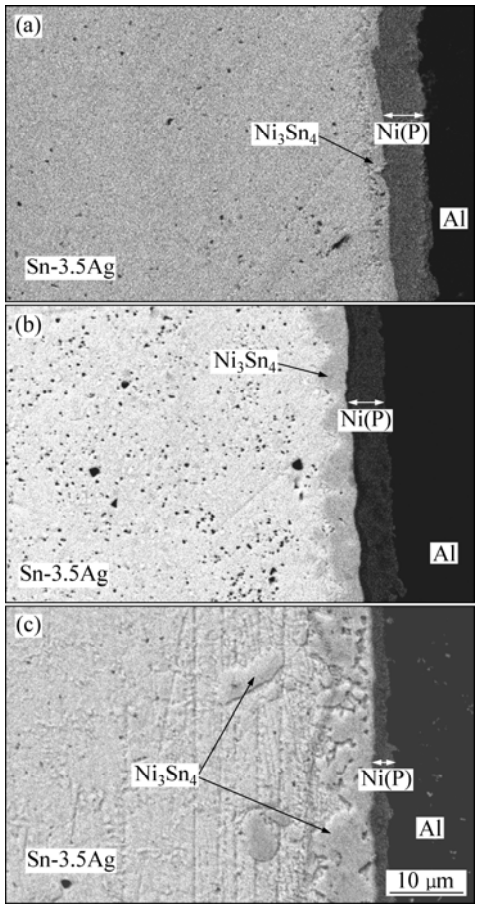

图 2　在 250℃钎焊不同时间后 Sn-3.5Ag/Ni-6.5P 横截面的 SEM 像

Fig.2　SEM images of cross-section of Sn-3.5Ag/Ni-6.5P interface during soldering at 250 ℃ for different times: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 30 min

形貌与能谱分析表明，IMC 层主要由 Ni_3Sn_4 IMC、Ni_3P 晶化层及较薄的 Ni-Sn-P 过渡层构成。在 Ni_3Sn_4 IMC 相中未检测到 P 元素，通常认为 P 元素不参与反应，当 Ni-P 层中的 Ni 消耗，富 P 层则形成 Ni_3P 晶化层[7−9]。由于 Ni_3P 具有多孔的细晶结构，会大大影响到 Ni 元素通过此层的扩散，在某些区域 Ni 的扩散较大，因此形成不同形状和厚度的 Ni_3Sn_4 IMC 层[12]。钎焊 5 min 时，在 Ni-P 薄膜表面形成了连续的 Ni_3Sn_4 IMC；随着钎焊时间的延长，界面 Ni_3Sn_4 IMC 呈现为颗粒状；当钎焊 30 min 时，Ni_3Sn_4 IMC 颗粒进一步长大，形成棱面状。

图 3 所示为钎焊不同时间后的 Ni_3Sn_4 IMC 平均厚度与钎焊时间(t_s)的关系。由图 3 可见，钎焊 5 min 后，IMC 平均厚度为 2.3 μm；钎焊 10 min 后，IMC 平均厚度为 3.2 μm；而钎焊 30 min 后，IMC 平均厚度达到 3.8 μm。通过拟合可知，Ni_3Sn_4 IMC 厚度与钎焊时间 $t_s^{1/3}$ 呈线性关系，表明随着钎焊时间的延长，IMC 的厚度增加速度减缓。

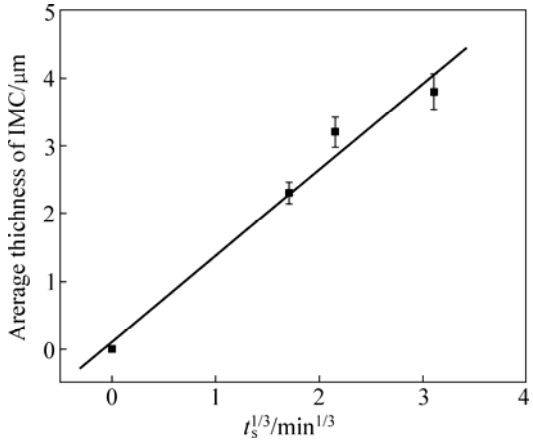

图 3 IMC 厚度与钎焊时间 $t_s^{1/3}$ 的关系

Fig.3 Thickness of IMC as function of cubic root of soldering time

2.3 时效过程中 Sn-3.5Ag/Ni-6.5P 界面 IMC 的生长行为

图 4 所示分别为 250 ℃钎焊 5 min 和 30 min 的 Sn-3.5Ag/Ni-6.5P 焊点在 150 ℃下时效 200 h 后横截面的 SEM 像。扫描电镜形貌与能谱分析表明，时效 200 h 后，钎焊界面层仍由 Ni_3Sn_4 IMC、Ni_3P 晶化层及较薄的 Ni-Sn-P 过渡层构成，时效过程未改变焊点的界面结构。由于时效过程中，钎料和 Ni-P 层之间发生元素的相互扩散，Ni_3Sn_4 IMC、Ni_3P 晶化层及较薄的 Ni-Sn-P 过渡层持续不断生长。从图 2 可以看出，钎焊 5 min 时未时效焊点中界面 IMC 层的平均厚度约为

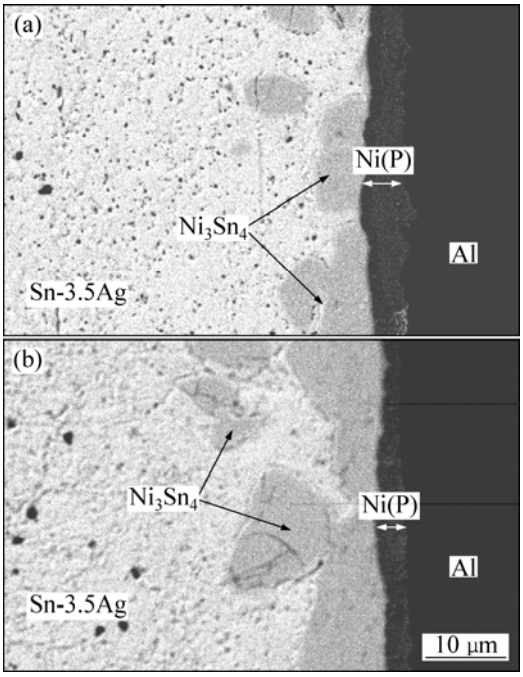

图 4 Sn-3.5Ag/Ni-6.5P 时效后的横截面的 SEM 像

Fig.4 SEM images of cross-section of Sn-3.5Ag/Ni-6.5P interface after aging: (a) Soldering at 250 ℃ for 5 min, then aging at 150 ℃ for 200 h; (b) Soldering at 250 ℃ for 30 min then aging at 150 ℃ for 200 h

2 μm，小于 Sn-3.5Ag/Cu 在 250 ℃下钎焊 5 min 焊点中界面 IMC 层的平均厚度[13]，这主要是由于相对于 CuNi(P)的扩散更弱些，使得 IMC 的生长较慢[7−9]；时效 100 h 后，界面 Ni_3Sn_4 IMC 的平均厚度达到 10 μm；时效 200 h 后，界面 Ni_3Sn_4 IMC 的平均厚度达到 11.7 μm。IMC 的生长可能与 Ni_3P 的晶化有关，因为在时效过程中，Ni_3P 的厚度不断增加，致使 IMC 处形成内应力，促使 Ni_3P 中形成微裂纹或由于柯肯达尔效应引起的孔洞[7−9, 14]，这些缺陷为 Ni 向界面进一步扩散形成 IMC 提供了短路扩散的途径。对于钎焊 30 min 的焊点时效 200 h 后，Ni_3Sn_4 IMC 层的平均厚度达到 14.6 μm，界面 IMC 出现较大的颗粒。图 5 所示为 Ni_3Sn_4 IMC 的生长速率与时效时间的对应关系。通过分析可知，IMC 的生长速率与 $t_a^{1/2}$ 呈线性关系。在 150 ℃下时效时，界面 Ni_3Sn_4 IMC 在钎焊 5 min 的焊点中的生长速率为 1.11×10^{-8} m/s$^{1/2}$，而界面 Ni_3Sn_4 IMC 在钎焊 30 min 的焊点中的生长速率为 1.37×10^{-8} m/s$^{1/2}$。两种生长速率相差不大，这主要是因为 IMC 的生长是由元素的扩散行为控制的。钎焊后焊点中 IMC 的厚度相差不大，元素的扩散路径基本相同，因此，观察到相接近的 Ni_3Sn_4 IMC 生长速率。本研究中 IMC 的生长速率与 HUANG 等[15]研究 Sn-3.5Ag/Ni-P 钎焊 30~60 s

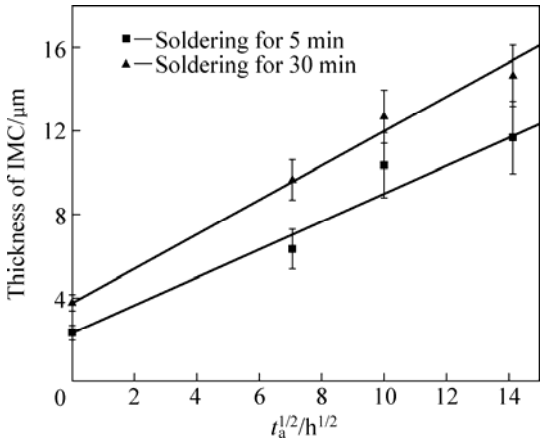

图 5　150 ℃时 Ni_3Sn_4 IMC 厚度与时效时间 $t_a^{1/2}$ 的关系

Fig.5　Relationship between thickness of Ni_3Sn_4 IMC and square root of aging time at 150 ℃

后时效过程中界面 IMC 的生长速率 1.63×10^{-8} m/s$^{1/2}$ 接近。

2.4　时效过程中界面富 P 层的生长行为

图 6 所示为在 250 ℃下分别钎焊 5 和 30 min 后焊点在 150 ℃下时效 0~200 h 界面富 P 层的生长厚度。从图 6 可以看出，在 150 ℃下时效后，富 P 层的厚度与时效时间 $t_a^{1/2}$ 呈线性关系，表明富 P 层的生长满足抛物线规律且受扩散控制。钎焊 5 min 的焊点中富 P 层在时效过程中的生长速率为 7.92×10^{-10} m/s$^{1/2}$，钎焊 30 min 的焊点中富 P 层在时效过程中的生长速率为 7.36×10^{-10} m/s$^{1/2}$。HUANG 等[15]在 Sn-3.5Ag/Ni-P 钎焊 30~60 s 后时效过程中得到的富 P 层的生长速率为 2.10×10^{-9} m/s$^{1/2}$，经比较可知本研究中得到的富 P 层

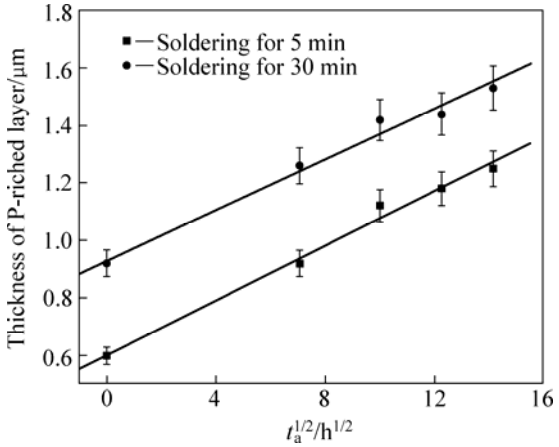

图 6　150 ℃时富 P 层厚度与时效时间的关系

Fig.6　Relationship between thickness of P-riched layer as function of square root of aging time at 150 ℃

生长速率均比 HUANG 等得到的富 P 层的生长速率小，这主要是由于本实验中钎焊时间长(5~30 min)，导致界面 IMC 及富 P 层的厚度均大于 HUANG 等[15]钎焊 30~60 s 得到的界面 IMC 及富 P 层的厚度，本实验中较厚的界面 IMC 的出现使时效过程中 Ni-P 层中的 Ni 向 Sn-3.5Ag 钎料中扩散的阻力增大，导致富 P 层的生长速率较低。

3　结论

1) 直径为(2.3±0.06) mm 的 Sn-3.5Ag 焊球与化学镀 Ni-6.5%P 薄膜在 250 ℃钎焊 5~30 min 得到的润湿角约为 44°，铺展率约为 67%。

2) 250 ℃下钎焊 5~30 min，Sn-3.5Ag/ Ni-P 焊点中界面由成分为 Ni_3Sn_4 的 IMC 层、Ni_3P 晶化层及较薄的 Ni-Sn-P 过渡层构成。随钎焊时间的延长，Ni_3Sn_4 IMC 晶粒逐渐长大，钎焊 5 min 时以小颗粒为主，钎焊 30 min 后，颗粒粗化，出现尺寸约 6 μm 的棱面状 Ni_3Sn_4 IMC 晶粒。Ni_3Sn_4 IMC 生长速率与钎焊时间 $t_s^{1/3}$ 呈线性关系。钎焊 10 min 后，也观察到在 Ni_3Sn_4 表面附着 Ag_3Sn 相。

3) 250 ℃下钎焊 5 和 30 min 的 Sn-3.5Ag/ Ni-P 焊点在 150 ℃下时效 200 h 后，界面层仍由 Ni_3Sn_4 IMC 层、Ni_3P 晶化层及较薄的 Ni-Sn-P 过渡层构成。时效过程中 Ni_3Sn_4 IMC 的生长与时间 $t_a^{1/2}$ 呈线性关系。界面 Ni_3Sn_4 IMC 在钎焊 5 min 的焊点中的生长速率为 1.11×10^{-8} m/s$^{1/2}$，而在钎焊 30 min 的焊点中的生长速率为 1.37×10^{-8} m/s$^{1/2}$。

4) 250 ℃下钎焊 5 和 30 min 的 Sn-3.5Ag/Ni-P 焊点在 150 ℃下时效过程中，界面富 P 层的生长速率与时效时间 $t_a^{1/2}$ 呈线性关系。钎焊 5 min 的焊点中界面富 P 层的生长速率为 7.92×10^{-10} m/s$^{1/2}$，钎焊 30min 的焊点中界面富 P 层的生长速率为 7.36×10^{-10} m/s$^{1/2}$。

REFERENCES

[1]　中国电子学会生产技术学分会丛书编委会组. 微电子封装技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
Series Edit Committee of China Electronics Academy of Manufacture and Technology. Micro-electronics packaging technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005.

[2]　宣大荣. 无铅焊接·微焊接技术分析与工艺设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
XUAN Da-rong. Lead-free welding·micro-welding technology

analysis and technics design[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.

[3] 金玉丰, 王志平, 陈 兢. 微系统封装技术概论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
JIN Yu-feng, WANG Zhi-ping, CHEN Jin. Microsystem packaging technology[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[4] MA H T, SUHLING J C. A review of mechanical properties of lead-free solders for electronic packaging [J]. Jounal of Materials Science, 2009, 44: 1141−1158.

[5] 刘 曦, 高加强, 胡文彬. 化学镀 Ni-P 合金在电子工业中的应用[J]. 电镀与精饰, 2006, 28(1): 30−34.
LIU Xi, GAO Jia-qiang, HU Wen-bin. Application of electroless Ni-P alloys in electronics industry[J]. Plating and Finishing, 2006, 28(1): 30−34.

[6] JANG J W, KIM P G, TU K N, FREAR D R, THOMPSON P. Solder reaction-assisted crystallization of electroless Ni-P under bump metallization in low cost flip chip technology[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85: 8456−8463.

[7] CHEN C J, LIN K L. The reaction between electoless Ni-Cu-P deposition and 63Sn-37Pb flip chip solder bumps during reflow[J]. Journal of Electronic Materials, 2000, 29: 1007−1014.

[8] HUNG K C, CHAN Y C, TANG C W. Correlation between Ni_3Sn_4 intermetallics and Ni_3P due to solder reaction-assisted crystallization of electrolee Ni-P metallization in advanced packages[J]. Journal of Materials Research, 2000, 15: 2534−2539.

[9] HUNG K C, CHAN Y C. Study of Ni_3P growth due to solder reaction-assisted crystallization of electroless Ni-P metallization[J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19: 1755−1757.

[10] 李 松. 电子封装焊料润湿性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 12.
LI Song. Wetting dynamics of solders in SMT[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006: 12.

[11] KIM H K, TU K N. Kinetic analysis of the soldering reaction between eutectic SnPb alloy and Cu accompanied by ripening[J]. Physical Review B, 1996, 53: 16027−16034.

[12] HE Min, LAU Wee-hua, QI Guo-jun, CHEN Zhong. Intermetallic compound formation between Sn-3.5Ag solder and Ni-based metallization during liquid state reaction[J]. Thin Solid Films, 2004, 462/463: 376−383.

[13] 于大全. 电子封装互连无铅钎料及其界面问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
YU Da-quan. Development of lead free solder and its interfacial issues in electronics packaging[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.

[14] ZENG K, TU K N. Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electroic packing technology[J]. Materials Science and Engineering Report, 2002, 38(1): 55−105.

[15] HUANG M L, LOEHER T, MANESSIS D, BOETTCHER L, OSTMANN A, REICHL H. Morphology and growth kinetics of intermetallic compounds in solid-state interfacial reaction of electroless Ni-P with Sn-based lead-free solders[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35: 181−188.

(编辑 龙怀中)