

厚膜电路铅锡端头电阻导电胶粘接阻值异常分析

王 洋 夏 伟

连云港杰瑞电子有限公司 江苏 连云港 222000

摘 要: 导电胶粘接元件是混合集成电路典型的组装工艺,以操作简单、可靠性高等优势被广泛应用。本文分析了某型DC/AC激磁电源内的片式电阻在导电胶粘接后,出现电阻阻值异常的不合格问题。经过生产过程、电路原理结构、材料等方面进行分析,并采取相应措施,解决了电阻粘接异常的不合格问题。

关键词: 元件粘接;混合集成电路;Kirkendall空洞

1 引言

随着电路功能和集成度不断提升,要求厚膜混合集成电路电路的组装要求简单和紧凑,同时具有较高的可靠性要求。因此对于小功率的DC/AC电源模块普遍采用聚合物粘接的方法来实现片式元件和芯片的导电粘接,替代焊接温度高、避免助焊剂多次清洗的合金焊接。失效的DC/AC电源模块采用铅锡和镀锡端头的片式电阻进行导电粘接,实现电路功能。随着DC/AC电源模块经过温度应力、机械应力、老炼筛选试验后,出现片式电阻接触电阻异常,具体故障现象为阻值升高,造成DC/AC电源模块电压和频率异常。因此对生产过程、片式电阻、粘接界面等进行不合格分析。

2 概述

该DC/AC电源模块(以下简称电源模块)电路原理是将直流电压转换为固定频率和正弦波输出。电源模块结构上采用可伐金属壳体、盖板和引出脚,内部基板采用典型的厚膜成膜基板,厚膜成膜基板粘接在金属壳体内,片式阻容元件和芯片等元器件粘接在成膜基板上,采用可伐金属盖板进行气密性封装。

3 初步故障定位

电源模块在筛选试验的老炼试验阶段发现输出参数漂移,电性能不合格。对失效电源开壳测试发现个别电阻阻值升高,测电阻端头与基板导体通断后,电阻阻值恢复,此时故障消失。不再复现,由此故障定位为电阻阻值异常。

4 故障排查

对于电阻阻值异常,从生产过程、电阻本体、电阻与导电胶粘接面进行分析。

4.1 生产过程排查

1) 电源模块的电阻粘接在基板上,基板采用的是成膜基板制造工艺,成膜基板的导线不可排除对电阻阻值的影响,因此对成膜基板工序的人、机、料、法、环、

测进行过程排查。

人:查该批成膜基板制造生产和检验人员均经过理论和实践知识考核合格后上岗。

机:查生产过程中所用设备均经过完好设备鉴定。测试设备均计量合格。工装均在使用寿命内。

料:查该成膜基板批使用的原材料均经过入厂检验和评价。

法:成膜基板制造按照工艺流程进行,生产记录均符合工艺文件要求。

环:查生产温湿度记录、洁净度记录和防静电记录均正常。

测:查成膜基板评价记录合格。

2) 电源模块的电阻与成膜基板采用粘接工艺,粘接过程不可排除对电阻阻值的影响,因此对粘接工序的人、机、料、法、环、测进行过程排查。

人:查粘接工序的操作和专检人员经过理论和实践知识考核合格后上岗。

机:查粘接工序使用的设备经过完好鉴定,测试设备均计量合格。工装均在使用寿命内。

料:查粘接使用的粘接剂和电阻均经过入库检验和评价。

法:元件粘接按工艺文件要求执行,查元件粘接记录未发现异常,与工艺文件一致。

环:查生产温湿度记录、洁净度记录和防静电记录均正常。查粘接剂贮存记录均正常。

测:查样品评价剪切力测试均符合测试要求。从元件粘接外观符合目检要求。将同批次的电源模块片式电阻进行剪切力测试,测试结果符合要求。

因此,可排除成膜基板制造过程和元件粘接过程的生产因素。

4.2 片式电阻排查

对同批次的片式电阻阻值均进行100%测试,未发现

阻值异常。故障电源模块中的片式电阻拆下后进行电阻测试,也未发现阻值异常。查电源模块使用的片式电阻端头的镀层材料为无铅和铅锡端头。

从显微镜观察两种端头的片式电阻看,两种片式电阻的端头无异常。

4.3 电阻粘接界面材料分析

将故障定位的片式电阻导电胶粘接界面和正常片式电阻导电胶界面进行成分对比分析。

表1 粘接面成分分析对比

分类	C	O	Ag	总计
故障界面	41.6	17.6	40.8	100
正常界面	44.2	11.6	44.2	100

从成分分析,C、O为导电胶有机聚合物成分,Ag为判断为导电胶中的金属颗粒。通过以上导电胶成分对比分析,故障电阻的导电胶和正常电阻的导电胶未发现明显异常。

将故障片式电阻和正常的片式电阻进行电阻端面的EDS对比分析。

表2 片式电阻金属端头成分分析对比

分类	C	O	Ni	Sn	Pb	Ag	总计
故障界面	8.3	4.9	/	77.9	/	8.9	100
正常界面	6.3	/	3.9	16.7	68.4	4.7	100

从以上拆卸的片式电阻端头表面成分分析,C、O均为导电胶有机聚合物成分,Ag为导电胶中的金属银粉,R25表面为镀锡残留,R17表面为铅锡和镀镍残留(经厂家了解镀层顺序为先镀镍、最外层镀铅锡)。从成分分析电阻端头表面未发现异常。

通过以上分析,可排除片式电阻和粘接界面的问题因素。

5 原因分析

5.1 导电胶粘接机理

导电胶是由聚合物和导电填料(Ag、Cu、Ni、C等)组成,其中导电填料的体积百分率为20%~30%。导电填料随机分布在聚合物之间形成网络。导电胶固化后,其有机聚合物分解,导电填料接触越来越近,电子通过导电接触点从一个导电颗粒流向另一导电颗粒,从而形成很多电子通道,实现导电连接。

5.2 导电胶粘接铅锡端头电阻电容失效机理

采用导电胶粘接铅锡金属化的片式元件(镀Sn或PbSn的片式电阻电容)时,经热应力环境后会生成金属间化合物 Ag_3Sn 和 Ag_4Sn ,Sn在Ag中的扩散系数比Ag在Sn中的扩散系数大三个数量级,因此Sn优先扩散与导电胶中的Ag生成金属间化合物(IMC),产生柯肯达尔空洞

效应,使其端头粘接面积减小,影响电气和机械性能。而且Sn在金属间化合物 Ag_3Sn 中的扩散系数又比Sn在Ag中的扩散系数大得多(大5个数量级),故进一步加剧了柯肯达尔空洞效应,最终导致片式元件端头粘接端头阻抗增大,改变产品电性能,影响其可靠性。

镀锡端头与导电银胶接触面失效在2000年左右已有多家机构进行研究。该界面暴露于150°C环境中,结合强度与接触电阻变化分别如下图所示。

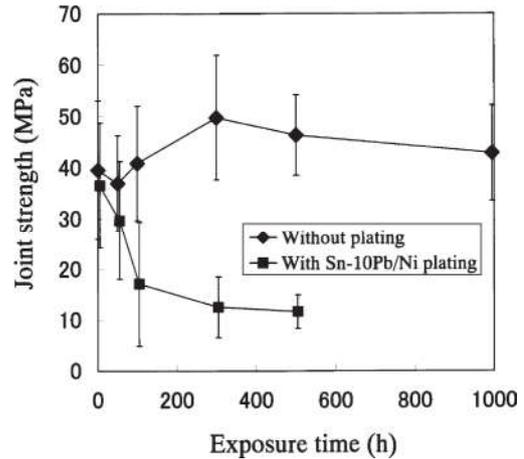


图1 结合强度随暴露时间变化

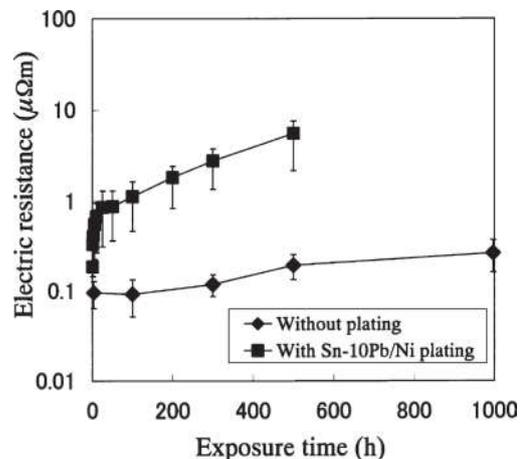


图2 接触电阻电阻率随暴露时间变化

据文献查询^[1],该文献对导电胶粘接元件接触电阻的稳定性进行了研究。通过对比试验,铅锡端头的元件与Ag基端头元件相比,接触电阻均值均发生明显变化。

文中指出:为保证批量工艺过程中导电胶粘接系统接触电阻的稳定性,采用Ag基或Au基端头是最佳的工艺方案,可有效降低工艺加工过程控制难度,从而实现批量加工过程中工艺及接触电阻的稳定。在本文试验中,对于Sn基端头的元件而言,在装配过程按压力不足或元件倾斜的情况下,试验过程中会出现接触电阻明显上升的现象,但导电胶并未发现裂纹。对于高可靠应用

场合，SnPb端头元件存在筛选后氧化、玷污等不可靠因素，不建议使用。

据文献查询^[2]，对厚膜混合集成电路粘接工艺进行了研究。其生产中多批次产品在测试时因电容粘接不良导致电性能失效。他们使用钯银端头电容和铅锡端头电容进行对比试验，试验后发现样品外观没有异常，但铅锡端头电容接触电阻波动很大，存在较大的质量隐患。钯

银端头电容接触电阻稳定。

5.3 失效过程

1) Sn发生扩散-形成Kirkendall空洞

Sn从电镀层中优先扩散，对Ag环氧树脂胶/Sn电镀界面的热降解起着关键作用，Ag和Sn在Sn、Ag和Ag₃Sn基体中的扩散参数，如表3所示。

表3

Table II. Diffusion Parameters

Element	Frequency Factor: D ₀ (m ² /s)	Activation Energy: Q (J/mol)	Diffusion Rate at 150°C: D (m ² /s)
Sn in Ag	1.70 × 10 ³	1.61 × 10 ⁵	2.31 × 10 ⁻¹⁷
Ag in Sn	1.00 × 10 ⁵	1.91 × 10 ⁵	2.32 × 10 ⁻²⁰
Sn in Ag ₃ Sn	4.01	9.55 × 10 ⁴	6.37 × 10 ⁻¹²
Ag in Ag ₃ Sn	1.03 × 10	9.38 × 10 ⁴	2.65 × 10 ⁻¹¹

在150°C时，Sn在Ag基体中的扩散常数(2.31×10⁻¹⁷m²/s)比Ag在Sn基体中的扩散常数(2.32×10⁻²⁰m²/s)要大(3个数量级)，此外，Sn在Ag₃Sn基体中的扩散常数(6.37×10⁻¹²m²/s)，Ag在Ag₃Sn基体中的扩散常数(2.65×10⁻¹¹m²/s)，相比Sn在Ag基体中的扩散常数更大(5~6个数量级)。这就意味着，在150°C下进行100h烘烤，镀锡端头即会发生明显退化，存在部分Sn向Ag基体中扩散，一旦形成Ag₃Sn金属间化合物，该扩散将会显著加剧，并同时发生Sn向Ag₃Sn基体扩散以及Ag向Ag₃Sn基体扩散，形成更多Kirkendall空洞。

2) 导电胶的解键与蠕变

我们使用的导电胶T_g(玻璃化转变温度)为80°C，老化试验与筛选试验的温度均远高于该温度，此时环氧树脂在微观上高分子开始解键，在宏观上则体现为整体发生蠕变。产生的Kirkendall空洞周围为自由界面，在界面附近的高分子会优先发生解键，部分气化，此时导电胶内部的应力分布与自由界面产生显著差异。导电胶表面收缩层引起的应力，将导致导电胶与Sn镀层界面的脱粘。Kirkendall空洞开始逐步扩大为微裂纹。当粘接端头存在离子污染物时，会形成自由界面，更容易产生微裂纹。

3) 微裂纹聚集为宏观断裂面

一定体积内微裂纹的分布满足正态分布，因此存在一定概率，使微裂纹较集中，聚集为宏观断裂面，造成接触电阻发生千欧数量级变化。因此，出现粘接电阻阻值异常是概率问题。且该问题的概率与烘烤温度、电阻端头离子污染等因素均有关系。

5.4 故障消失情况分析

故障消失的原因均为断裂面被填补，比较典型的故

障消失方式如下：

1) 轻轻按压导电胶，此法显然能够消除导电胶与电阻端头接触界面空隙。

2) 在不接触导电胶的前提下，测量电阻。使用万用表测量，会给电阻两端加一个9V的电压，断裂面处会快速聚集电荷，两个界面间产生电场力，起到与按压导电胶相同的作用。实验中也发现，电阻恢复的过程为数值降低速率逐渐加剧，最后骤变为标定值的过程。

3) 通电正常工作后故障消失。正常工作电压为3V交流电，故障消失机理与2)一致。

故障不消失的原因本质上为外力过小无法填补断裂面，如在串一个大电阻的情况下测量目标电阻，电应力不足以使裂缝消失。当施加足够应力时，故障现象就会消失。

由于应力因素填补了界面上的断裂面，而断裂面形成需要再次迁移，因此故障消失后，很难恢复。

综上所述，因为不同金属扩散引起粘接失效的特点如下：

1) 随机性：由于自由界面形成的随机性，裂纹的逐步聚集与扩展的随机性，以及电阻变化对电路性能影响的突变性，导致故障发生的时间随机。发生部位主要集中在敏感电路的电阻端头，具体哪个端头出现具有一定的随机性。变化阻值也有一定的随机性。

2) 隐蔽性：一方面，端头阻值不是一下变大，而是逐渐变大。在阻值变化较小时，非敏感电路很难发现。筛选过程电测试中不易发现。另一方面，由于金属间迁移形成的空洞和裂纹是微观结构，一般失效分析手段很难发现断裂裂纹。

6 故障复现

利用双85试验(即85°C85%湿度)模拟产品快速故障复现,接触电阻发生个位数数量级变化的概率已超过一半,有约5%的样品发生千欧数量级变化。双85试验证实了锡\铅锡端头电阻导电胶粘接的接触电阻会发生变化。利用相同工艺的电源模块样品进行温循和机冲后,阻值未发现异常。

7 纠正措施和结论

针对电阻阻值异常,我们对该电源模块生产过程的人机料法环测进行排查,未发现生产过程异常。并且对电阻本体、电阻与导电胶粘接面进行分析,同样未发现异常。经过资料查询和机理分析,故障定位在以锡和铅锡端头片式电阻端头向导电胶内的银进行迁移,而产生的Kirkendall空洞,该空洞产生了微裂纹造成阻值异

常。该微裂纹又无法观察到,因此具有一定的隐蔽性。通过双85试验进行了故障复现,但电源模块由于在气密性封装内,很难故障复现,也说明了该故障现象发生几率极低。

纠正措施:1)该电源模块进行返工,对镀锡\铅锡端头元件更换为钯银或镀金端头元件。

2)修改工艺设计规范,明确工艺设计要求:采用导电胶粘接的片式元件端头金属化镀层应为钯银(PdAg)或金端头。铅锡端头的片式电阻应采用再流焊工艺组装。

参考文献:

[1]肖玲,何万波.导电胶粘接元件接触电阻的稳定性研究[J].微电子学,2016年8月,46(4):576~580.

[2]刘颖潇,林政,张天会.厚膜混合集成电路粘接工艺研究[J].电子世界,2019年,18(5):16~20.