

SiP 陶瓷芯片水汽含量控制工艺方法研究

蒋 尚, 刘鸿瑾, 刘 群, 付宝玲
(北京轩宇空间科技有限公司 北京 100086)

摘要: 结合宇航级陶瓷封装芯片的特点和水汽控制要求, 对 SiP 陶瓷封装工艺进行了研究, 分析了陶瓷封装过程中产生水汽的各个因素, 优化了封装生产工艺流程, 增加了预烘转运过程下厂监制, 保证了转运时间的工艺过程管控, 通过试验验证了管控措施的有效性。

关键词: SiP 陶瓷封装; 水汽含量; 下厂监制; 过程管控

中图分类号: TN453 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)05-0011-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210520002

引用格式: 蒋尚, 刘鸿瑾, 刘群, 等. SiP 陶瓷芯片水汽含量控制工艺方法研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(5): 102-107.

Analysis and control of excessive water vapor in SiP ceramic chip

JIANG Shang, LIU Hongjin, LIU Qun, FU Baoling
(Beijing SunWise Space Telemetry Ltd., Beijing, 100086, China)

Abstract: In this paper, combined with the characteristics of aerospace ceramic packaging chip and water vapor control requirements, the SiP ceramic packaging process has been studied. The factors of water vapor in the ceramic packaging process have been analyzed, the packaging production process has been optimized, the factory supervision during the pre drying and transfer process has been added, and the process control of the transfer time has been ensured. The effectiveness of the control measures has been verified through experiments.

Key words: SiP ceramic package; Water vapor; Factory supervision; Process control

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210520002

Citation: JIANG Shang, LIU Hongjin, LIU Qun, et al. Analysis and control of excessive water vapor in SiP ceramic chip [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(5): 102-107.

引 言

SiP (System in a Package) 陶瓷封装是指将不同种类的元件, 通过不同技术混载于陶瓷封装之内, 构成的一种系统级封装。常用的 SiP 陶瓷封装芯片具备腔体大、装胶量多、气密性要求高等特点, 对封装过程中工艺管控要求非常高。随着航空、航天及其他特殊领域对封装芯片的可靠性要求越来越高, 加强微电路封装产品的工艺要求和过程控制是满足可靠性要求的关键环节和必要措施^[1]。由于军用陶瓷封装的芯片使用寿命要求至少为 20 年, 如果气密性封装电路的内部水汽含量过高, 会使芯片及电连接系统发生各种物理化学反应, 从而造成电路参数不稳定甚至失效。为保证封装芯片的可靠性, 需要对芯腔内部的水汽含量进行有效的控制^[2-6]。对于 SiP 类电路而言, 由于内部装胶量多, 如果封装工艺控制不到位, 极易出现电路在经过寿命试验或破坏性物理分析 DPA (Destructive Physical Analysis) 后水汽值超标现象, 从而导致电路批次性问题。基于此, 本文分析了 SiP 陶瓷封装芯片的水汽含量影响因素, 提出了封装过程中控制水汽含量的工艺方法, 规避产品在后续试验过程中水汽超标风险。

1 SiP 陶瓷芯片水汽控制要求

SiP 陶瓷封装芯片可分为单腔和双腔两种结构, 采用混合集成工艺, 芯片内部采用回流焊工艺进行

电容表贴,采用键合工艺进行芯片互连,芯片外壳一般采用合金熔封工艺或平行缝焊工艺进行封帽,以保证电路的密封性。本文以双腔 SiP 陶瓷芯片为例,其中腔一采用合金熔封工艺,高温导电胶装片;腔二采用平行缝焊工艺,低温导电胶装片,填充胶贴装阻容。芯片在封装完成后经过内部目检、X 射线,检测过程中颗粒碰撞噪声检测 PIND (Particle Impact Noise Detection)、老炼前测试的早期失效剔除电路。完成老炼试验后,测试样品进行内部气氛测量,依据 GJB548B-2005 要求,陶瓷封装芯片在完成所有筛选试验之后,其内部水汽含量在 100℃条件下不得超过 5 000 ppm。

2 水汽影响因素分析

有关芯片内部水汽主要来源的研究比较多^[7],本文通过研究认为,影响 SiP 陶瓷芯片内部水汽含量的因素主要有 4 个:封帽环境、原材料吸附、封装工艺和水汽测试方法。生产过程中影响 SiP 陶瓷芯片水汽含量的影响因素如图 1 所示。

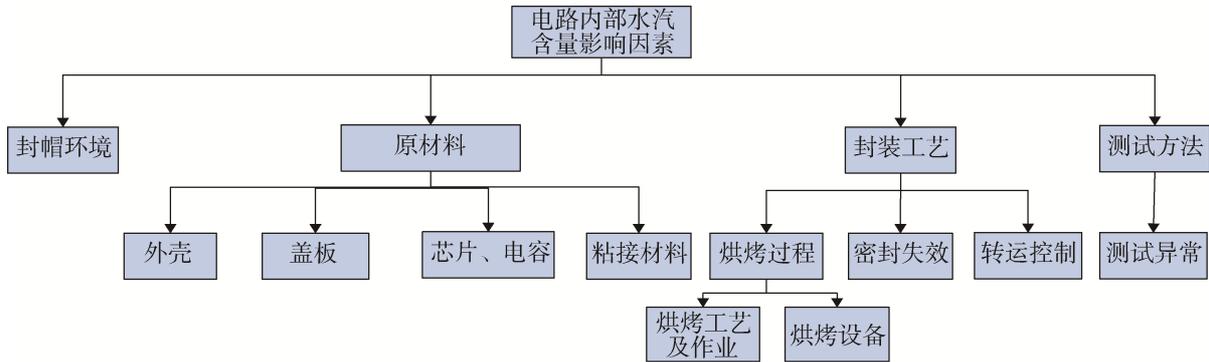


图 1 SiP 芯片内部水汽影响因素

Fig. 1 Fault analysis tree of excessive water vapor in SiP chip

2.1 封帽环境分析

SiP 陶瓷芯片的封帽密封组装环境为百级净化车间。腔二的密封封装环境是在平行缝焊机内部操作台进行的,平行缝焊机操作台完全密封,在平行缝焊过程中机器内部持续充入洁净氮气(液化 N₂ 纯度 99.99%)进行排湿,使用电子露点计对机器内部进行水汽含量监控,具体要求为内部露点要求 < -40℃ (露点 -40℃ 对应的水汽含量为 127 ppm,露点与水汽含量对照表见表 1)。若内部露点 ≥ -40℃,则平行缝焊机将报警并停止运行。封装环境引入的最大水汽含量为 127 ppm,内部气氛监控结果见表 2,平行缝焊机设备内部气氛含量在正常范围内。

表 1 标准状态下露点与水蒸气含量对照表
Table 1 Comparison table of dew point and steam content under standard state

露点/℃	水蒸气含量 (20℃、760 mmHg)	
	ppm	g/m ³
-30	375	0.281
-32	304	0.228
-34	246	0.184
-36	198	0.148
-38	159	0.119
-40	127	0.094 9
-42	101	0.075 5

2.2 原材料分析

2.2.1 外壳

陶瓷芯片外壳的主要材料是黑色 Al₂O₃ 陶瓷和金属化镀层,陶瓷体为密实烧结,无多孔结构,金属化镀层表面光滑平整,对水汽几乎没有吸附能力。黑瓷外壳是陶瓷封装的基础材料,所有陶瓷封装电路均使用该种结构,水汽含量未出现异常。

表 2 设备内部气氛监控表

Table 2 Internal atmosphere monitoring table of equipment

设备编号	内部水汽含量 (ppm)		
	1	2	3
P/W-1	25	210	127

2.2.2 盖板

平行缝焊盖板主要由 4J42 铁镍钴合金基材、电镀 Ni、Au 镀层组成,表面光滑平整,对水汽几乎没

有吸附能力。4J42 铁镍钴合金因其热膨胀系数与陶瓷非常接近,是陶瓷封装中使用最多的金属材料,无水汽超标风险。电镀 Ni、Au 镀层在制造过程中会有 H_2 产生,镀层内部会有少量残留。盖板镀层内残留的 H_2 若释放至芯腔中,可能会与氧气发生反应生成水汽。盖板镀层释放气体时会留下气泡,检查测试的 2 只样品,表面光滑无气泡,无 H_2 释放痕迹。

2.2.3 芯片及电容

芯片的基底材质是单晶硅,表面是二氧化硅玻璃钝化层。电容的外层主要材料是陶瓷,两端端子是锡。腔体内部贴装的电路均是无机材料和金属材料,不具备吸附大量水汽的条件。

2.2.4 粘接材料

腔体使用的粘接材料是低温导电胶和填充胶,胶体中含有大量的环氧树脂,而环氧树脂中含有大量的脂基和羟基等极性基团,对水汽有很强的吸附作用^[8]。同时,两款胶在高温时可能会有部分分解或发生反应,生成一些有机气体和水。SiP 电路封帽前在 125°C 条件下进行了 168 h 的稳定性烘焙处理,以保证内部生成和吸附的水汽排净。

2.3 封装工艺分析

2.3.1 预烘工艺及作业

SiP 电路在经过平行缝焊封帽之前,需进行多次烘烤以保证导电胶和填充胶内部,生成和吸附的水汽尽量排出。各次烘烤条件如下:

- ① 使用前外壳预烘: 150°C , 24 h, VAC;
- ② 稳定性烘焙: 125°C , 168 h, N_2 ;
- ③ 封帽前外烘: 150°C , 48 h, N_2 (真空氮气循环 2 次);
- ④ 封帽前内烘: 150°C , 2 h, VAC。

以上使用的平行缝焊模块电路的预烘处理方法为成熟工艺,长期用于平行缝焊模块电路的封装,未出现工艺过程导致的水汽超标情况。同时,可通过电路预烘生产记录表,记录和追踪电路是否均按照工艺规定的烘烤条件完成了预烘作业。

2.3.2 转运控制

为保证平行缝焊模块电路内部气氛正常,需对 SiP 陶瓷封装芯片进行多次长时间的预烘处理,故电路需在多个烘箱间进行转移。电路在经过平行缝焊封帽之前,需经过多道工艺流程,如图 2 所示。

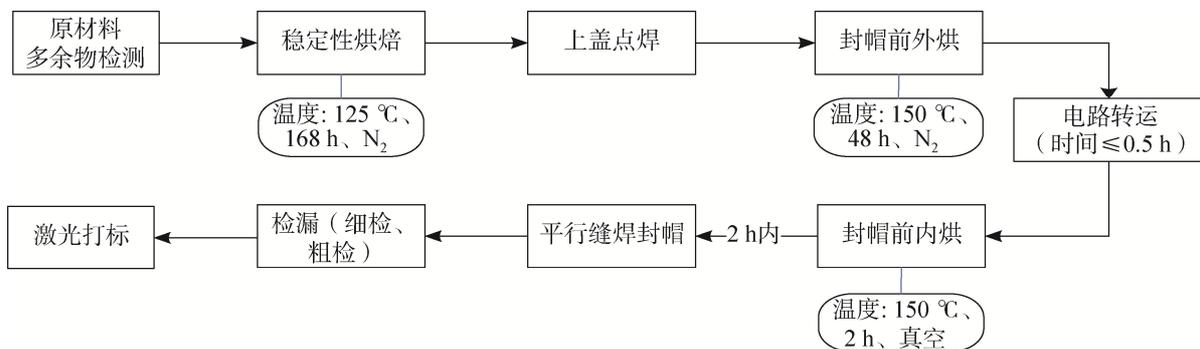


图 2 SiP 电路平行缝焊工艺流程

Fig. 2 Process flow of parallel seam welding for SiP circuit

根据上述平行缝焊的流程要求,针对电路的流转时限存在两点要求:

① 封帽前预烘环节(外烘至内烘):电路在 N_2 环境下经 150°C 、48 h 的外烘处理后,需在 0.5 h 内转移至平行缝焊机自带的内部烘箱中,监控的时限为电路暴露于空气状态下的时间。

② 封帽前预烘(内烘)至平行缝焊环节:电路在平行缝焊机的真空环境下,经 150°C 、2 h 预烘完成后,需在 2 h 内完成平行缝焊。

在烘焙完成后的转运环节,启动烘箱、烘烤后电路拿取以及电路转移各生产环节均由作业人员手动作业,可能会导致部分电路未及时转移,在外部停留时间超时,导致烘烤完成的电路在外界重新吸收空

气中的水分。因此,转运环节的工艺流程控制对于电路内部水汽控制非常重要。

2.3.3 烘烤设备

根据生产过程记录进行追溯,对 SiP 封装芯片在封帽前的各个预烘烤作业过程所使用的烘烤设备状态进行复查,电路生产过程中,所使用的烘烤设备,在其相应的使用时间段内,可追踪设备状态是否正常,有无异常记录。

2.3.4 密封失效

电路密封失效水汽进入腔体也会导致水汽检测超标,因此,所有气密性封装产品出货前会进行气密性检测。依照 GJB548B-2005 中“方法 1014.2 密封”试验要求,产品所有电路均须密封检测合格方能出厂开展后续试验。

2.4 封装工艺分析

内部气氛测试是通过刺穿电路后测试内部释放气体的水含量。若测试过程中出现未完全刺穿,质谱仪未校准,空气漏入等异常现象,会造成内部水汽含量测试数据异常。通过检查送检样品的内部水汽含量测试数据,检查气压、氮气含量、氧气含量、氩气含量和氦气含量均无异常,测试过程正常。

通过对以上影响因素的分析,电路在进行外烘焙转内烘焙过程中,如果在外部停留时间超时,烘烤完成的电路在外界重新吸收空气中的水分,内烘焙不足以将吸收的水分充分释放,在经过后续老炼测试和寿命试验后,吸收的水分充分释放到腔体内会导致芯片内部水汽值增加。为了规避转运控制环节水汽吸附风险,本文对原工艺控制过程进行了完善,在烘箱转运环节采取了工艺过程管控,对转运过程进行了严格的操作和记录。

3 工艺过程管控措施

3.1 工艺管控措施

针对 SiP 电路封帽前稳定性烘焙转运至外烘焙和外烘焙转运至内烘焙过程中,存在外部停留超时吸附水分的风险。本文制定了平行缝焊转运环节工艺管控措施如下:

① 在完成多余物检测后,对准备进行稳定性烘焙的电路进行序列号排序,并按序放置在托盘中;按序列号周转,并在生产记录表中记录每批次转运电路的序列号。

② 对每台烘焙设备建立《烘烤运行记录表》,对设备的烘焙过程进行详细记录。按照人、机、料、法、环、测(5M1E)六个维度,《烘烤运行记录表》的记录内容至少应包括以下信息:

a. 机器信息:日期、设备编号。

b. 物料信息:电路型号、电路子批号、电路系列号、电路数量。

c. 人员信息:电路放入时间、放入操作人、电路取出时间、取出操作人、续烘开始时间。

d. 操作规程:烘烤条件、烘烤时间、烘烤程序。

鉴于烘焙设备的运行环境、设备的校准状态和操作人员的资质等信息属于车间管理内容,《烘烤运行记录表》不做描述。

③ 将原有工艺中的上盖点焊工序放入内烘焙工序之后,电路经过内烘焙后转移至平行缝焊机,在平行缝焊机内一起完成点焊和平行封焊。原有工艺环节中电路经过稳定性烘焙后,需将盖板与未封帽的电路进行点焊后再进行外烘焙。通过对原有工艺进行分析,点焊后的电路虽处于敞开状态,但未完全敞开,在烘焙环境下不利于水汽的充分扩散,且烘焙过程中盖板有可能同时吸附水汽;另一方面,由于点焊工序必须在平行封焊机内完成,烘焙后进行点焊需要进行两次电路转运,增加了电路转运中吸附水汽的风险。

④ 在完成稳定性烘焙转至外烘焙的电路转运环节,设置转运时间要求。由于导电胶暴露在空气环境下,会吸附周围空气中的水汽,环氧树脂的吸水过程比较复杂,其吸水量与时间 t 的关系可用一个通式表示^[9]:

$$M = Kt^n \quad (1)$$

K 为扩散系数常数, n 为扩散类型指数, 一般 n 值介于 1/2~1 之间。

由式 (1) 可知, 吸水量与时间呈正相关函数, 随着时间的递增吸附的水汽越多, 并在开始的 24 h 内快速吸水并达到饱和^[8]。因此, 尽量减少电路暴露于空气中的时长, 可有效降低水汽吸附风险。根据以上原理, 本文对原有成熟工艺转运时长进行了优化设计:

a. 在稳定性烘焙转运至外烘焙环节, 考虑到烘焙转运后还需要进一步进行烘焙, 可将电路暴露于空气状态下的时间设定为原有成熟工艺的最大时长即 0.5 h;

b. 对于外烘焙转运至内烘焙环节, 尽量缩短电路暴露于空气中的时间, 将原有时长的 2 h 缩短为转运操作的正常允许时间即 5 min。

⑤ 为了对设备状态和烘烤运行记录进行确认和监督, 确保工艺管控流程按照要求执行, 对电路转运环节的关键工序设立下厂监制和督查, 监制人员需对《烘烤运行记录表》、工艺规程、指导文件、运行环境和设备状态等信息进行确认和签署, 确保在转运环节能够严格按照要求执行工艺规程。

具体工艺管控流程如图 3 所示, 工艺管控具体内容见表 3。

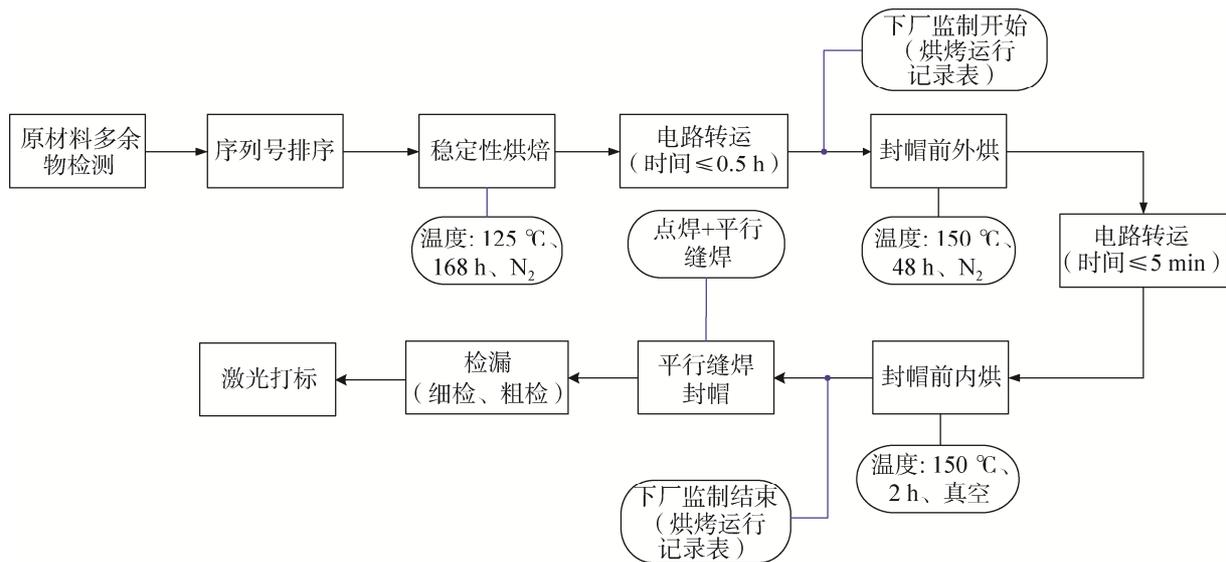


图 3 SiP 电路平行缝焊转运环节工艺控制流程图

Fig.3 Process flow of parallel seam welding transfer environment for SiP circuit

表 3 SiP 电路平行缝焊工艺控制流程

Table 3 Process control flow of parallel seam welding for SiP circuit test results

工艺步骤	工艺参数控制	烘箱转运时间控制	生产记录管控	备注
电路序列号排序	将电路按照序列号排序, 并按序放置在托盘中; 记录每批次转运电路的序列号。	/	《烘烤运行记录表》	/
稳定性烘焙	150℃、48 h、N ₂	/	《烘烤运行记录表》	每天确认烘箱状态、设置烘箱封条
电路转运	烘箱门关闭, 降温至 90℃ 打开炉门取出电路, 立即关闭炉门	转运时间 ≤ 0.5 h	《烘烤运行记录表》	对剩余电路仍需烘烤, 程序: 150℃、48 h、N ₂ 循环
外烘焙	150℃、48 h、真空 N ₂ 循环	/	《烘烤运行记录表》	确认烘箱状态、设置烘箱封条
电路转运	烘箱门关闭, 降温至 30℃ 打开炉门取出电路后, 需立即关闭炉门	转运时间 ≤ 5 min	《烘烤运行记录表》	剩余电路仍需烘烤, 程序: 150℃、2 h、N ₂ 循环;
内烘焙	180℃、2 h、真空	无需转运	《烘烤运行记录表》	/
点焊+平行缝焊	N ₂ 环境、2 h 之内完成封帽	/	/	所有操作在平行封焊机内完成

3.2 水汽验证试验结果

对 SiP 电路平行缝焊工艺进行工艺过程管控后, 将封装的试验电路交到专业检测机构进行水汽检验, 检测结果见表 4, 水汽含量控制取得了良好的结果。

检测结果显示, 组件内部水汽含量均值为 382 ppm, 满足 GJB548B 对于宇航级电路内部水汽低于 5 000 ppm 要求。采用工艺过程管控后封装的电路水汽值处于水汽非常低的状态, 说明该工艺管控措施对水汽含量的控制非常有效。

表 4 水汽检测结果

电路编号	水汽含量	氮气含量	氩气含量
1#	396 ppm	98.4%	284 ppm
2#	481 ppm	98.4%	159 ppm
3#	351 ppm	98.4%	263 ppm
4#	334 ppm	98.4%	208 ppm
5#	346 ppm	98.4%	189 ppm

4 结束语

电路在封装过程中预烘转运环节转运时间有严格限制, 如果转运操作监管不严、转运过程超时必然会导致电路内部水汽含量的增加。改善并建立完备的过程管控工艺流程能有效降低电路内部水汽含量。本文以双腔 SiP 陶瓷芯片为例, 针对转运环节设计了合适的工艺控制流程, 使产品很好地满足了宇航级封装产品的水汽控制要求。

参考文献

- [1] 陈鹏, 欧昌银. 微电路封装产品内部水汽含量的分析与控制方法[J]. 电子与封装, 2004(3): 20–23.
CHEN Peng, OU Changyin. Analysis and control of moisture content in microcircuit manufactured packages[J]. Electronics & Packaging, 2004(3): 20–23.
- [2] 丁荣峥. 气密性封装内部水汽含量的控制[J]. 电子与封装, 2001(1): 34–38.
- [3] 王林, 赵宇军, 黄先奎, 等. 集成电路内部水汽含量的控制[J]. 微电子学, 2003(2): 121–123.
WANG Lin, ZHAO Yujun, HUANG Xiankui, et al. The control of moisture in integrated circuits[J]. Microelectronics, 2003(2): 121–123.
- [4] 严雨宁, 沈娟, 王君, 等. 小尺寸器件电路气密性封装工艺的水汽控制[J]. 传感器世界, 2019, 25(11): 13–16.
YAN Yuning, SHEN Juan, WANG Jun, et al. Water vapor control of hermetic packaging process for small size devices[J]. Sensor World, 2019, 25(11): 13–16.
- [5] 杨程, 金家富, 任榕. 多芯片微波组件内部水汽含量控制研究[J]. 电子工艺技术, 2019, 40(1): 14–16.
YANG Cheng, JIN Jiafu, REN Rong. Research on moisture content control in multi-chip microwave module[J]. Electronics Process Technology, 2019, 40(1): 14–16.
- [6] 谈侃侃, 杨世福, 李茂松, 等. 混合微电路内部水汽含量控制技术[J]. 微电子学, 2014, 44(4): 546–549.
TAN Kankan, YANG Shifu, LI Maosong, et al. Moisture content control methods for hybrid electronic device[J]. Microelectronics, 2014, 44(4): 546–549.
- [7] 赵晓明. 组件封装腔体水汽含量超标分析[J]. 山西电子技术, 2018(6): 22–25.
ZHAO Xiaoming. Superstandard analysis of moisture content in package cavity[J]. Shanxi Electronic Technology, 2018(6): 22–25.
- [8] 万超, 王玲, 杜彬, 等. 湿热环境下导电胶封装可靠性能研究[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(5): 265–268.
WAN Chao, WANG Ling, DU Bin, et al. Investigation on packing reliability of isotropic conductive adhesive under humid and hot environment[J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(5): 265–268.
- [9] 张树永, 罗小雯, 李善君, 等. 环氧树脂的吸水研究[J]. 化学通报, 1997(8): 32–36, 31.

[作者简介]

- 蒋 尚 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高可靠芯片封装设计、电子设备可靠性设计。
刘鸿瑾 1980 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为高可靠芯片设计、微系统设计。
刘 群 1978 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为芯片系统封装设计、质量控制。
付宝玲 1976 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为产品过程控制、质量控制。