

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.03.010

## 粗化预电镀引线框架的可靠性研究

张德良, 朱 林\*, 郑浩帅, 杨永学, 黄 伟

(新恒汇电子股份有限公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 使用自主研发的电镀粗镍用电镀液, 制备了粗化预电镀引线框架产品, 并对产品粗化度的影响因素进行了研究, 最终量化了粗化度与可靠性之间的关系。研究表明, 电镀液中的主盐及微结构剂含量、电流密度、镀镍层厚度是影响预电镀引线框架表面粗化度的关键因素, 将框架表面粗化度 S-ratio 控制在 $\geq 1.2$ , 能够保证粗化预电镀引线框架的可靠性, 该研究有望推动实现该类产品的国产化替代。

**关键词:** 电镀粗镍; 电镀液; 引线框架; 粗化度; 可靠性

**中图分类号:** TN405

**文献标识码:** A

## Research on the reliability of roughen pre-electroplated lead frame

Zhang Deliang, Zhu Lin\*, Zheng Haoshuai, Yang Yongxue, Huang Wei

(Henghui Technology Co., Ltd., Zibo 255000, China)

**Abstract:** A self-developed electroplating solution was used to prepare roughened pre-electroplated lead frames, the factors that affecting the roughness of the products was studied, and finally, the relationship between roughness and reliability was investigated. The research results indicate that the main salt and microstructure agent content in the electroplating solution, current density, and thickness of nickel layer are key factors affecting the surface roughness of pre-electroplated lead frames. Controlling the surface roughness S-ratio above 1.2 could ensure the reliability of roughened pre-electroplated lead frames, which is expected to promote the localization and substitution of such products.

**Keywords:** electroplating rough nickel; electroplating solution; lead frames; roughness; reliability

预电镀引线框架(Pre-Plating frame Finish, PPF)作为引线框架产品种类之一, 是指在引线框架表面电镀镍层、钯层和金层或其它金属层, 免去封装后的电镀锡工艺(Post plating)<sup>[1-2]</sup>。与其它类型的引线框架产品相比, 预电镀引线框架不仅能够发挥引线框架的全部功能要求<sup>[3]</sup>, 而且消除了锡须风险<sup>[4]</sup>, 同时降低了制造成本, 并更加符合环保要求。因此,

自1989年德州仪器将预电镀引线框架应用于集成电路封装产业后, 预电镀引线框架受到了广泛的研究与应用。

已有研究表明, 在集成电路封装产业中所用的环氧树脂类型的塑封料与贵金属层之间的结合力较差, 且镍钯金预电镀引线框架上表现尤为明显, 使得芯片、预电镀引线框架与环氧树脂塑封料完成

收稿日期: 2024-12-28

修回日期: 2025-02-16

**作者简介:** 张德良(1995—), 男, 博士, 中级工程师, 研究方向为集成电路中引线框架制造、引线键合及封装测试等, email: zhangdeliang@henghuiic.com

**通信作者:** 朱林(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 万人计划、山东省泰山产业领军人才, 研究方向为引线框架制造、物联网 eSIM 芯片封测以及晶圆减薄划片与测试等, email: zl@henghuiic.com

**引用信息:** 张德良, 朱林, 郑浩帅, 等. 粗化预电镀引线框架的可靠性研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(3): 67-72.

Zhang Deliang, Zhu Lin, Zheng Haoshuai, et al. Research on the reliability of roughen pre-electroplated lead frame[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(3): 67-72.

封装后,其湿度敏感性等级最高达到三级(MSL-3),无法满足更高等级的可靠性要求<sup>[5-8]</sup>。然而,随着引线框架类封装芯片产品在人工智能、物联网、智能制造、生物医疗、航天航空等领域的广泛应用,对该类产品的可靠性等级要求越来越高。因此,可靠性等级低成为预电镀引线框架广泛应用的关键限制因素。在业界,通常采用粗糙化预电镀引线框架表面的方法,增加框架与环氧树脂塑封料之间的接触面积,以提高二者之间的结合力,使得预电镀引线框架与芯片完成封装后能够满足MSL-1以及更高等级的可靠性要求。日本的三井、韩国的HDS等公司通过在框架表面电镀一层粗糙镍层,再依次电镀钯层和金层,形成粗糙预电镀引线框架产品,使得产品的可靠性等级能够达到MSL-1要求。电镀粗糙的镍层,需要以电镀液为基础,目前国内尚未有商业化的粗镍电镀液,因此国内的引线框架制造厂无法生产制造粗糙预电镀引线框架产品,国内芯片封装厂使用的该类产品皆需要从国外购买。本工作基于自行研发的粗镍电镀液,打通了粗糙预电镀引线框架的生产制造工艺,有望实现粗糙预电镀引线框架的国产化替代。

本公司之前的研究工作表明,基于自行研发的粗镍电镀液制备的粗糙预电镀引线框架,其可键合性完全满足行业内的使用要求<sup>[9]</sup>。在此基础上,本工作对所制造的粗糙预电镀引线框架的可靠性进行了研究。研究结果表明,我司通过自行研发的粗镍电镀液以及生产制造工艺制备的粗糙预电镀引线框架产品,其可靠性完全满足MSL-1要求,有望推动粗糙预电镀引线框架产品的国产化替代。

## 1 实验部分

### 1.1 粗镍电镀液配方

目前,提高预电镀引线框架表面粗糙度的方法主要有两种,第一种是日本框架厂三井、韩国框架厂HDS所采用的电镀粗镍层后,电镀钯层、金层;第二种是先进半导体厂(ASM)采用第二代微蚀技术制备出粗糙的铜表面,再依次电镀镍层、钯层和金层。本工作采用第一种方法,使用自行研发的粗镍电镀液,达到构筑预电镀引线框架粗糙表面的目的。

我司自主研发的粗镍电镀液,主要包含开缸剂、稳定剂、微结构剂以及分散剂等四种成分,其中,开缸剂是主盐离子的主要来源、稳定剂能够保证电镀液在使用过程中pH值维持稳定、微结构剂是形成粗糙镍的关键成分、分散剂使得粗糙镍结构在

框架表面分布更加均匀<sup>[10]</sup>。本研究中,所用粗镍电镀液中各组分的具体含量为:开缸剂40~100 g/L(按照镍离子浓度管控)、稳定剂40 g/L、微结构剂50~150 g/L、分散剂6 g/L。

### 1.2 粗糙预电镀引线框架制备工艺

本文制备粗糙预电镀引线框架的工艺流程为:除油→酸洗→水洗→电镀粗镍→水洗→电镀钯→水洗→电镀金→水洗→Anti-EBO处理→水洗→烘干。所用铜材型号为A194ESH,厚度为0.203 mm,产品的封装类型为方形扁平无引脚封装(Quad Flat No-leads Package, QFN)。

### 1.3 粗糙预电镀引线框架的可靠性测试

本文制备的粗糙预电镀引线框架完成上芯、引线键合、塑封后,首先进行了MSL-1的可靠性等级测试,测试条件为:125℃烘烤24 h→85℃/85% RH处理168 h→回流焊(3次)→超声扫描反射显微成像(C-SCAN)确认分层情况,若无分层,说明产品可靠性等级达到MSL-1;在完成MSL-1测试的基础上,继续进行500次温度循环测试(TC500),测试条件为:在-65℃~150℃的温度区间范围内进行500次循环测试,每次循环时长为5 min,测试完成后使用C-SCAN确认分层情况<sup>[11-12]</sup>。

### 1.4 粗糙预电镀引线框架的表面形貌及粗糙度测试

粗糙预电镀引线框架产品的表面形貌使用型号为Apero S的扫描电子显微镜进行测试。

由于引线框架较薄(0.102~0.254 mm),普遍使用的结合力测试方法无法直接用于测试引线框架与塑封料之间的结合力,考虑到结合力与表面粗糙度为正相关关系,因此在本文中未曾出现结合力的相关数据,而是用粗糙度作为一种量化指标表示框架与塑封料之间的结合力及可靠性。在业界,粗糙预电镀引线框架的表面粗糙度使用表面积与横截面积的比值(S-ratio, Sr)来量化表示<sup>[13]</sup>。粗糙预电镀引线框架的表面粗糙度使用基恩士白光干涉激光显微镜VK-X3000进行测试,在1 200倍的放大倍数下,框选100 μm×100 μm的区域进行粗糙度测试,该设备可测量出框选区域内的表面积,而框选区域的横截面积为10 000 μm<sup>2</sup>,则设备可给出表面粗糙度的数值Sr。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电镀液组分含量对粗糙度的影响

在自行研发的粗镍电镀液组分中,主盐离子与

微结构剂是形成粗糙镍结构的关键成分,因此本工作首先研究了电镀液组分中的主盐离子以及微结构剂的含量对预电镀引线框架表面粗化度的影响。通过图1(a)可以看出,在电镀条件及其它电镀液组分保持不变的情况下,当主盐含量分别为40、60、80及100 g/L时,框架的表面粗化度分别为1.163、1.314、1.394、1.421,说明预电镀引线框架表面的粗化度随着主盐含量的升高而增大。此外,当主盐含量为80 g/L及100 g/L时,对应的粗化度分别为1.394、1.421,粗化度的变化幅度减小,说明当主盐含量高于80 g/L时,预电镀引线框架表面的粗化度变化不再明显。通过图1(b)可以看出,在改变电镀液中微结构剂含量并保证电镀条件不发生改变时,微结构剂含量分别为50、100以及150 g/L时,框架的表面粗化度分别为1.241、1.358、1.525,说明随着电镀液中微

结构剂含量的增加,预电镀引线框架表面的粗化度增大。

电镀液中主盐离子以及微结构剂含量对粗化度的影响是通过改变电镀过程中镍离子的电沉积行为来实现的。先前的研究表明,微结构剂作为一种化学吸附添加剂,能够显著改变金属离子的沉积行为,其在电极表面的覆盖度影响了电镀层形态的变化及形态的完整性<sup>[14-15]</sup>,因此电镀液中微结构剂的含量会对镀层的粗化度产生影响。而主盐浓度则是通过对金属离子扩散传质速度影响金属离子的沉积行为,主盐浓度高,扩散传质速度快,晶粒的生长速度越快,而形成较为粗大的晶粒,但当主盐浓度达到一定的含量后,扩散传质对电沉积过程的影响不再明显<sup>[16-17]</sup>,因此框架表面粗化度随着主盐浓度增加的变化趋势是先增大,而后变化平缓。

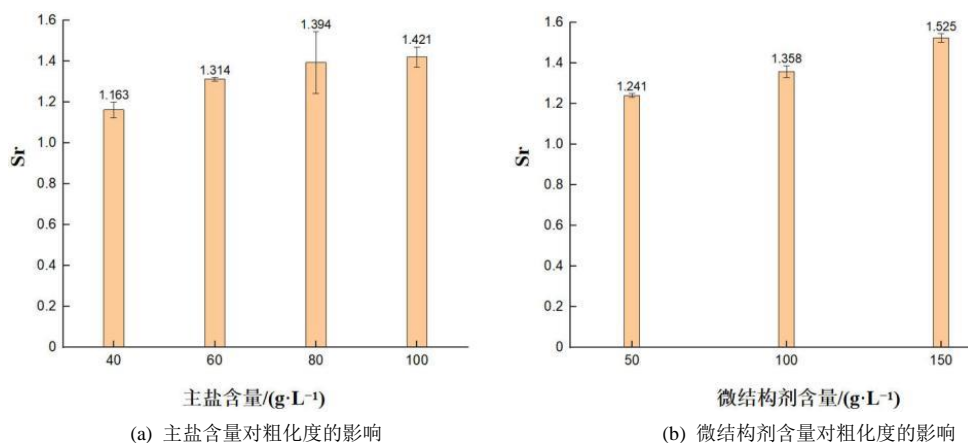


图 1 电镀液组分含量对粗化度的影响

Fig.1 Influence of component content in electroplating solution on roughness

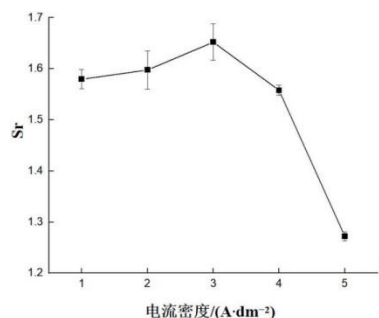
## 2.2 电镀工艺对粗化度的影响

在粗镍电镀液中各个组分含量保持恒定的前提下,本工作进一步研究了电镀工艺条件对预电镀引线框架表面粗化度的影响。通过图2(a)可以看出,在电镀过程中,当电流密度小于3 A/dm<sup>2</sup>时,随着电流密度的增加,预电镀引线框架表面的粗化度有所增加,但当电流密度大于3 A/dm<sup>2</sup>时,随着电流密度的增加,预电镀引线框架表面的粗化度出现明显降低。根据电镀过程中的晶体生长理论可知<sup>[18-19]</sup>,在一定的电流密度范围内,电流密度增大,晶核的形成速率高于晶核的生长速率,形成的电镀层越细致,但电流密度过高,则会导致镀层“烧焦”问题,破坏镍层的粗糙结构;而电流密度减小,则晶核的生长速率高于晶核的生成速率,形成粗糙的电镀层,而当电流密度过小,则会导致结晶缓慢,镍层

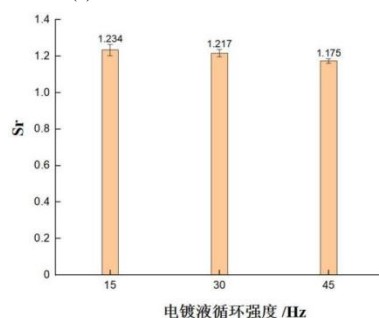
的粗糙结构生长不充分,导致粗化度降低。因此,结合电流密度对粗化度影响的实验结果可知,在使用我司自主研发的粗镍电镀液时,电流密度为3 A/dm<sup>2</sup>是较为理想的电镀条件。

在实际生产过程中,电镀槽分为母槽以及上子槽两部分,变频泵将粗镍电镀液从母槽打入上子槽,再由上子槽溢流回母槽。引线框架在经过上子槽的过程中,完成粗糙镍层在框架表面的沉积。其中,变频泵能够通过改变泵的 frequency 以改变粗镍电镀液在母槽与上子槽之间的循环强度,因此本工作研究了电镀液循环强度对预电镀引线框架表面粗化度的影响。通过图2(b)可以看出,预电镀引线框架表面粗化度随着药水循环强度的增加而有所降低,考虑到循环强度增加能够加快气泡从框架表面的脱离速度从而提高镀层质量,因此将药水循环强度固

定在30 Hz。



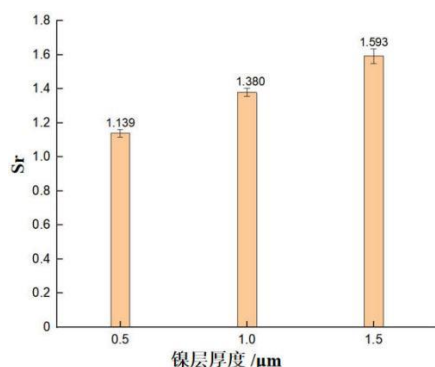
(a) 电流密度对粗化度的影响



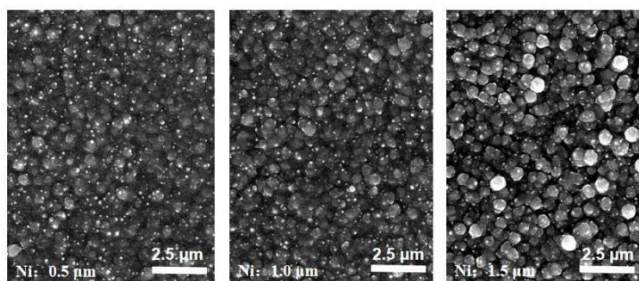
(b) 电镀液循环强度对粗化度的影响

图2 电镀工艺对粗化度的影响

Fig.2 Influence of electroplating process on roughness



(a) 镍层厚度对粗化度的影响



(b) 0.5 μm

(c) 1.0 μm

(d) 1.5 μm

图3 镍层厚度对粗化度及形貌的影响

Fig.3 Influence of Ni layer thickness on roughness and morphology

## 2.4 粗化度对塑封后预电镀引线框架可靠性的影响

通过提高预电镀引线框架表面的粗化度以提高框架塑封后的可靠性，而粗化度越高，封装后产品的可靠性等级越高。为了保证粗化预电镀引线框架完成封装后的可靠性，需要明确框架表面粗化度的管控标准，换言之，需要明确最小粗化度的管控标准。

在业界，塑封后框架的可靠性一般采用可靠性测试，通过检测塑封环氧树脂与框架之间是否出现分层进行判定。芯片、框架与塑封料之间结合的过程称之为封装，封装的大致流程为，将芯片黏贴在

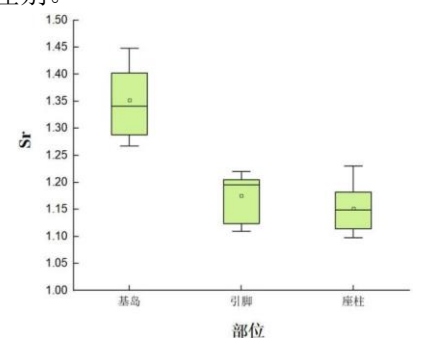
## 2.3 镍层厚度对粗化度及形貌的影响

在保持粗镍电镀液成分不变，电流密度采用  $3 \text{ A/dm}^2$ ，药水循环强度为30 Hz的条件下，本工作进一步研究了镍层厚度对预电镀引线框架表面粗化度的影响。在业界，通常将预电镀引线框架的镍层厚度范围规定为  $0.5 \sim 3.0 \mu\text{m}$ <sup>[20-21]</sup>。而从成本角度考虑，框架厂在制备粗化预电镀引线框架时通常以满足粗化度的最小厚度进行管控。从图3(a)中可以看出，镍层厚度为0.5、1.0以及1.5  $\mu\text{m}$ 时，对应的表面粗化度分别为1.139、1.380、1.593，说明随着镍层厚度的增加，预电镀引线框架表面粗化度升高。进一步地，通过三种不同厚度镍层的表面形貌可以看出(图3(b)-(d))，随着镍层厚度的增加，镀层表面的颗粒状结构更加明显，说明镀层厚度的增加，使得颗粒状的粗糙结构能够充分生长，从而提高粗化预电镀引线框架表面的粗化度。通过镍层厚度影响粗镍颗粒状结构生长情况的结论进行推测，主盐浓度、微结构剂含量、电流密度以及药水循环强度对粗化度的影响，其本质是对颗粒状粗糙结构生长情况的影响。

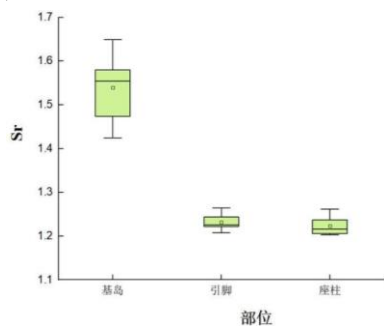
基岛上，通过引线将芯片与引脚相连接，完成连接后放入塑封模具中，将熔融态的环氧树脂塑封料注入塑封模具中完成封装<sup>[22]</sup>。在完成封装进行可靠性测试的过程中，集成电路内部分层的主要发生区域为环氧树脂塑封料与芯片之间、塑封料与引线框架之间、芯片与装片胶之间、装片胶与引线框架之间<sup>[5]</sup>，其中，塑封料与引线框架之间的封层则主要发生在座柱、引脚以及基岛等位置<sup>[23]</sup>。因此，需要对基岛、引脚、座柱的粗化度进行管控，并在可靠性等级测试中重点关注三种位置处的塑封料与框架之间的分层情况。



本工作制备了两组粗化度不同的粗化预电镀引线框架产品, 第一组粗化引线框架产品基岛处的粗化度平均值为1.352、引脚处的粗化度平均值为1.175、座柱处的粗化度平均值为1.151, 如图4(a)所示; 第二组粗化引线框架产品基岛处的粗化度平均值为1.539、引脚处的粗化度平均值为1.232、座柱处的粗化度平均值为1.223, 粗化度数据如图4(b)所示。在引线框架电镀过程中, 通过基岛、引脚与座柱位置的电流大小是相同的, 但三个位置处的截面面积不同, 因此电流密度是不同的。结合电流密度对粗化度影响的研究结果(图2(a))可知, 不同电流密度对应的粗化度不同, 因而基岛、引脚、座柱处的粗化度存在差别。



(a) 第一组粗化预电镀引线框架不同部位粗化度



(b) 第二组粗化预电镀引线框架不同部位粗化度

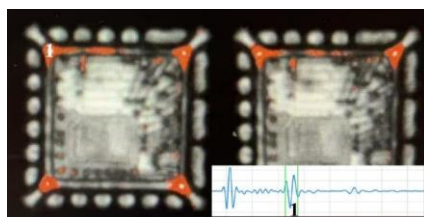
图 4 两组预电镀引线框架不同部位粗化度

Fig.4 Roughness of two sets of pre-electroplated lead frames at different positions

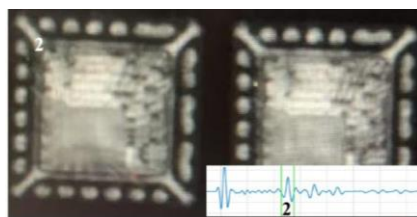
将两组不同粗化度的粗化预电镀引线框架完

成上芯、引线键合、塑封后, 同步进行了可靠性等级测试。两组粗化度的粗化预电镀引线框架在经过MSL-1的可靠性测试后, 都未出现分层现象。在完成MSL-1可靠性测试的基础上, 进一步开展了TC500的可靠性测试, 完成TC500的可靠性测试后, 经过C-scan测试发现, 两组粗化度不同的预电镀引线框架产品出现了不同的分层情况。如图5(a)所示, 为第一组粗化预电镀引线框架的C-SCAN扫描结果, 图中座柱位置呈现红色, 且位置1处对应的扫描波形为反相波形, 说明框架与塑封料之间出现了分层问题<sup>[24]</sup>; 而粗化度较高的第二组粗化预电镀引线框架在经过TC500的可靠性测试后, 并未观察到红色区域, 且位置2处对应的扫描波形未出现反相波形(图5(b)中右下方曲线图中标注2处的波形), 说明框架与环氧树脂塑封料之间未出现分层问题(图5(b))。通过对比两组不同粗化度的预电镀引线框架塑封后的可靠性测试结果可知, 粗化度提高有助于提升预电镀引线框架的可靠性。此外, 引脚与座柱之间的粗化度接近, 但二者之间的可靠性却存在差异, 其原因是引脚、座柱与塑封料之间的接触面积不同。在未粗化的情况下, 引脚的面积即大于座柱的面积, 因此在完成粗化后, 即使二者粗化度数值接近, 但与塑封料之间的接触面积, 依然是引脚大于座柱, 最终导致二者之间的分层情况不同。

对比两组粗化预电镀引线框架座柱处的粗化度可以发现, 发生分层的座柱粗化度平均值为1.151, 而未发生分层的座柱粗化度平均值为1.223。封装厂的实际生产经验表明, 将预电镀引线框架表面各处的粗化度控制在 $Sr \geq 1.2$ , 可保证塑封后集成电路的可靠性。由图4可知, 预电镀引线框架不同位置处的粗化度关系为: 基岛>引脚>座柱, 因此, 为保证粗化预电镀引线框架的可靠性, 需对座柱位置处的粗化度进行管控, 保证座柱位置处的粗化度大于1.2, 即保证了座柱、引脚及基岛位置处的粗化度皆大于1.2, 从而保证预电镀引线框架的可靠性。



(a) 第一组粗化预电镀引线框架可靠性测试后出现分层



(b) 第二组粗化预电镀引线框架可靠性测试后未出现分层

图 5 粗化度对塑封后粗化预电镀引线框架可靠性的影响

Fig.5 Influence of roughness on the reliability of pre-electroplated lead frames with roughening after encapsulation

### 3 结论

通过对粗化预电镀引线框架产品的可靠性研究,主要得到以下结论:

(1) 粗化度是决定粗化预电镀引线框架可靠性的关键因素,为保证塑封后预电镀引线框架的可靠性,需要保证框架表面的粗化度 $Sr \geq 1.2$ ;

(2) 为保证粗化预电镀引线框架表面的粗化度大于1.2,镍层厚度需管控在 $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ ;

(3) 电流密度是影响粗化预电镀引线框架表面粗化度的关键因素之一,在生产过程中可将镀粗镍的电流密度管控在 $3 \text{ A}/\text{dm}^2$ 左右;

(4) 就粗镍电镀液本身而言,主盐含量以及微结构剂含量对预电镀引线框架表面粗化度的影响较大,在生产过程中可将主盐含量管控在 $60 \sim 100 \text{ g/L}$ ,微结构剂含量管控在 $50 \sim 150 \text{ g/L}$ 。

目前,粗化预电镀引线框架的可靠性研究只进行到温度循环测试(TC500),尚需进一步更严格的可靠性等级测试,逐步解决可靠性等级测试过程中反馈出的问题,完善粗化预电镀引线框架的生产制造标准,有望推动实现粗化预电镀引线框架产品的国产化替代。

### 参考文献

- [1] 李庆生. PPF 框架在半导体工业中的应用[J]. 电子与封装, 2010, 10(3): 36-39, 43.
- [2] 李明. IC 引线框架镍钯金电镀技术及其最新进展[C]//上海市电子学会电子电镀专业委员会. 2006年上海电子电镀学术报告会资料汇编. 上海交通大学材料科学与工程学院; 2006: 24.
- [3] 姚梦雨, 李壮壮. 集成电路中引线框架的质量影响分析[J]. 电子质量, 2024(10): 96-100.
- [4] 王谊清. 引线框架合金表面电镀锡工艺及锡须生长机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [5] 周朝峰, 周金成, 李习周. 引线框架塑料封装集成电路分层及改善[J]. 电子与封装, 2016, 16(1): 5-8.
- [6] 李玉, 黄彩清, 刘天德. 镍框架与环氧树脂之间的粘接力改善研究[J]. 粘接, 2022, 49(1): 51-54, 60.
- [7] 秦苏琼, 侍二增, 谭伟, 等. 环氧树脂和酚醛树脂对芯片框架粘结力的研究[J]. 电子工业专用设备, 2015, 44(8): 1-4, 36.
- [8] 刘玉莹, 陈超, 吴海文, 等. 面向车规级芯片产品的安全可靠性认证方案研究[J]. 标准科学, 2024(10): 60-64.
- [9] 张德良, 朱林, 郑浩帅, 等. 粗化预电镀引线框架的可键合性研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(12): 107-113.
- [10] 张德良, 郑浩帅, 邢猛, 等. 预电镀引线框架用镍层结构可控的电解液及其制备方法和应用方法: 中国, 202410840243.X[P]. 2024-07-23.
- [11] 夏浩. QFN 用铜基镀银 IC 引线框架抗分层表面处理技术[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(3): 19-23.
- [12] 杨妙林, 任瑛. 集成电路分层的失效分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(增 1): 36-40.
- [13] Klaichit K, Srisrual A. Improvement of S-ratio measurement method for single-in-line package lead frame roughness[C]//2024 1st International Conference on Robotics, Engineering, Science, and Technology (RESTCON). Pattaya, Thailand: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024: 129-132.
- [14] Hang T, Li M, Fei Q, et al. Characterization of nickel nanocones routed by electrodeposition without any template[J]. Nanotechnology, 2008, 19(3): 035201.
- [15] Damjanovic A, Paunovic M, Bockris J O. The mechanism of step propagation and pyramid formation on the (100) plane of copper from in situ nomarski-optical studies[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 1965, 9(2): 93-111.
- [16] 袁诗璞. 第五讲——电镀液的组分及其作用(一)[J]. 电镀与涂饰, 2008(11): 41-44.
- [17] 郑利峰. 氨络合物体系电积镍的阴阳极机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
- [18] 袁诗璞. 第十二讲——影响镀层烧焦的因素[J]. 电镀与涂饰, 2009, 28(7): 45-48.
- [19] 吴辉煌. 电极学原理[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1991: 35.
- [20] 崔洪波, 方健, 宋洋, 等. 镍钯金表面引线键合工艺的可靠性及应用[J]. 电子工艺技术, 2024, 45(2): 14-18.
- [21] 余梦星, 赵刚俊. 镍钯金镀层对邦定可靠性影响研究[J]. 印制电路信息, 2021, 29(增 2): 131-139.
- [22] 王兴超, 宋永兵, 杜丰田. 半导体封装生产线工艺流程研究[J]. 通讯世界, 2024, 31(4): 142-144.
- [23] 肖海洪. 塑封分立器件的分层问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [24] 王旭亮, 杨达明, 黄姣英. 基于超声扫描的塑封器件缺陷判定方法研究[J]. 电子器件, 2020, 43(1): 39-45.