

纳米银浆在芯片粘接中的可靠性与失效模式分析

刘道林

中国电子科技集团公司第二十九研究所 四川 成都 610051

摘要: 随着半导体器件向高功率、小型化方向发展,传统粘接材料已难以满足高温、高可靠性需求。纳米银浆凭借优异导热导电性与高温稳定性,成为芯片粘接的理想材料,但粘接层剥离和开裂等可靠性问题制约着其产业化应用。本文系统分析纳米银浆材料特性以及粘接工艺参数对其可靠性的影响,并系统性阐述了环境适应性测试、加速度实验和寿命试验等可靠性评价方法,深入剖析粘接层典型失效模式及内在机理,最终从材料、工艺、设计三方面提出优化策略。本研究表明银颗粒分散性与烧结活性、固化温度与界面预处理、服役环境的温湿度循环等因素共同影响粘接层可靠性。界面剥离和银层开裂是主要失效模式,热应力累积与微观缺陷扩展是关键机理。通过材料改性、工艺优化和结构设计,粘接可靠性显著提升,高低温循环寿命超1500次,粘接强度合格率超85%。为提升芯片粘接质量提供理论支撑,推动纳米银浆在半导体封装领域的稳定应用。

关键词: 纳米银浆; 芯片粘接; 失效模式

引言: 在半导体封装技术迭代中,芯片粘接作为核心环节,直接决定器件服役性能与寿命。传统锡铅焊料存在环保隐患,有机胶黏剂导热性差,无法适配车规级、航天级芯片的严苛工作环境。纳米银浆以银纳米颗粒为核心成分,经烧结后形成高致密性导电导热层,其室温电阻率可低至 $1.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,导热系数达 $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上,高导电和导热性远超传统材料。目前纳米银浆已在IGBT、LED等器件中初步应用,但在复杂服役环境下,粘接层易出现剥离、开裂等失效问题,导致器件故障。据行业数据显示,纳米银浆粘接失效引发的芯片故障占比达32%,因此深入研究其可靠性与失效模式,对推动半导体器件升级具有重要现实意义。

1 纳米银浆芯片粘接工艺与可靠性影响因素

1.1 纳米银浆材料特性

纳米银浆的材料特性直接决定粘接层基础性能,核心参数包括银颗粒粒径、分散稳定性、流变特性及烧结活性。银纳米颗粒粒径通常控制在 $20\text{-}100 \text{ nm}$,小粒径颗粒虽烧结活性高,但易团聚导致分散不均;粒径过大则会降低烧结致密性,一般采用 50 nm 左右颗粒可实现性能平衡。分散剂种类与含量影响浆体稳定性,聚乙烯吡咯烷酮(PVP)作为常用分散剂,含量控制在 $3\%\text{-}5\%$ 时可有效防止颗粒团聚,过量则会残留形成绝缘层。流变特性需适配涂覆工艺,触变性指数在 $1.2\text{-}1.5$ 之间时,既能保证印刷精度,又能避免流挂。烧结活性与颗粒表面状态相关,经脂肪酸修饰的银颗粒可降低烧结温度,在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下即可形成连续导电网络,未修饰颗粒则需提升至 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

1.2 芯片粘接工艺参数

芯片粘接工艺参数的精准控制是保障可靠性的关键,核心包括涂覆方式、固化工艺与加压条件。涂覆方式中,丝网印刷适用于批量生产,网版目数选择与浆体黏度匹配, 500 目网版可实现 $10\text{-}20 \mu\text{m}$ 的均匀涂层,其厚度偏差可以控制在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 内;点胶工艺则适用于异形芯片,当点胶压力为 $0.2\text{-}0.3 \text{ MPa}$ 、且点胶头速度保持在 $5\text{-}10 \text{ mm/s}$ 时可避免气泡产生。固化工艺采用“升温-保温-降温”三段式曲线,升温阶段速率 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 可有效减少热应力避免芯片和基板等开裂,在 $180\text{-}200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 $60\text{-}90 \text{ min}$ 能确保纳米银浆充分烧结,降温阶段速率 $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 可以有效改善降温过快导致应力释放不充分引起纳米银粘接层开裂的问题。加压条件需与芯片尺寸匹配,例如 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 芯片的加压条件为 $0.4\text{-}0.6 \text{ MPa}$,若压力过小将会导致纳米银粘接层致密性不足,压力过大则易造成芯片破损,加压时机选择在升温至烧结温度后的保温阶段,此举可优化粘接界面的分布^[1]。

1.3 可靠性影响因素

纳米银浆粘接可靠性受材料、工艺、环境多因素协同影响。材料层面,银浆中银含量低于 85% 时,导电通路易断裂,含量过高则浆体流动性变差;杂质含量超过 0.1% 会显著降低粘接强度。工艺层面,涂覆厚度不均会导致应力集中,烧结不充分则残留孔隙率将会超过 10% ,进而直接引发导热性能下降问题。环境因素中,高低温循环会因热膨胀系数差异产生界面应力, $-55 \text{ }^\circ\text{C}\text{-}150 \text{ }^\circ\text{C}$ 循环 500 次后,粘接强度将下降 40% ;湿热环境($85 \text{ }^\circ\text{C}/85\% \text{ RH}$)会加速纳米银的氧化,在工作 2000 h

后其接触电阻将会增大3倍；振动冲击则易使缺陷处萌生裂纹，例如在10Hz频率、5g加速度振动试验中100h即出现粘接层剥离现象。另外，芯片与基板的表面粗糙度需控制在0.5-1 μm ，过低影响机械咬合，过高易藏污纳垢。

2 纳米银浆粘接层可靠性测试方法

2.1 环境适应性测试

环境适应性测试用于模拟纳米银浆粘接层的实际服役工况，核心包括高低温循环、湿热老化、盐雾腐蚀与振动冲击测试。高低温循环测试依据IEC60068-2-14标准，设定-55 $^{\circ}\text{C}$ （保温30min）至150 $^{\circ}\text{C}$ （保温30min）为一个循环，记录不同循环次数下粘接强度与电阻变化，通常要求1000次循环后粘接强度合格率 $\geq 80\%$ 。湿热老化测试按GB/T2423.4执行，在85 $^{\circ}\text{C}$ 和85%相对湿度环境下持续老化，每500h检测一次，重点监测银层氧化与界面剥离情况。盐雾腐蚀测试主要针对车载等户外应用场景，在5%氯化钠溶液喷雾环境下持续1000h后粘接层表面腐蚀面积需小于5%。振动冲击测试采用正弦振动，10-2000Hz频率范围内扫频，加速度5-20g，通过激光测振仪监测粘接层振动响应进而表征其振动冲击稳定性。

2.2 加速寿命试验（ALT）

加速寿命试验通过强化环境应力缩短测试周期，快速预测粘接层服役寿命，常用方法包括温度加速、湿度加速与复合应力加速。温度加速试验基于阿伦尼乌斯模型，选取120 $^{\circ}\text{C}$ 、150 $^{\circ}\text{C}$ 、180 $^{\circ}\text{C}$ 三个应力水平，监测不同温度下粘接强度衰减规律，计算激活能并外推室温寿命，纳米银浆粘接层激活能通常在0.8-1.2eV之间。湿度加速试验采用佩克模型，采用恒定温度100 $^{\circ}\text{C}$ 并设定不同湿度梯度（60%、75%、90%RH），建立湿度与失效时间的关联方程。复合应力加速结合温度、湿度与振动，按正交试验设计应力组合，如（120 $^{\circ}\text{C}$,90%RH,10g）、（150 $^{\circ}\text{C}$,75%RH,15g）等，通过极差分析确定主导应力因素，其预测寿命与实际服役数据偏差可控制在15%以内。

2.3 微观表征技术

微观表征技术用于解析粘接层内部结构与失效细节，常用手段包括扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）、X射线衍射（XRD）与能谱分析（EDS）。SEM可清晰观察粘接层表面与断面形貌，识别孔隙分布、裂纹萌生位置及界面结合状态，通过图像分析软件计算孔隙率，正常烧结的粘接层孔隙率应低于5%。TEM用于观察银纳米颗粒烧结后的晶粒尺寸与晶界结构，未失效粘接层晶粒尺寸均匀，约100-200nm，失效后晶粒异常长大至500nm以上^[2]。XRD通过特征峰强度变化分析银相结构，氧化失效时会出现 Ag_2O 特征峰，峰强

随失效程度增加而增强。EDS用于元素分布检测，可定位界面污染物与元素扩散区域，明确是否存在分散剂残留或金属互扩散现象。

3 纳米银浆粘接层失效模式与机理分析

3.1 典型失效模式

纳米银浆粘接层的典型失效模式，依据失效位置与具体表现可细致划分为三类，分别是界面剥离失效、银层内部开裂失效以及导电导热性能衰减失效。界面剥离失效主要发生在芯片与银浆的接触界面，或是银浆与基板的连接界面处。在宏观层面，会明显观察到器件的电阻急剧升高，严重影响器件的正常工作；从微观角度看，能够发现界面处存在清晰且明显的缝隙。据统计，此类失效在整体失效情况中占比高达55%。银层内部开裂失效则表现为银层内部出现贯穿性的裂纹，这些裂纹大多沿着孔隙周边开始萌生，随后逐步扩展。这种失效会直接导致粘接强度大幅下降其降幅可达50%以上，在所有失效类型中占比30%。导电导热性能衰减失效较为特殊，其表面并无明显的宏观缺陷，但银层的电阻率会增大3倍以上，导热系数也会下降40%。这主要是由于银层发生氧化以及晶粒长大所引发的，在所有失效情况中占比15%。而且不同应用场景下失效模式也存在一定差异，比如车载器件多以界面剥离为主，航天器件则更易出现银层开裂。

3.2 失效机理建模

基于大量的实验数据，构建起失效机理模型，以此清晰明确各失效模式的形成路径。界面剥离失效的机理是热应力累积与纳米银浆烧结浸润不充分共同作用的结果。芯片与基板由于热膨胀系数存在差异，在经历温度循环时界面处会产生交替的拉压应力，界面结合强度通常范围在15-20MPa之间，当这些应力超过界面结合强度时，界面就会萌生出微裂纹。倘若在涂覆纳米银浆时浸润情况不佳，界面结合面积就会相应减少，原本微小的裂纹便会迅速扩展，最终形成界面剥离，这一过程可以通过内聚力模型进行量化分析。银层内部开裂失效主要源于烧结缺陷与疲劳损伤，在固化工艺的操作和工艺参数不当时，银层会产生孔隙，这些孔隙就成为了应力集中的源头。在受到振动或者经历热循环时，孔隙周边的应力达到银的屈服强度，其值约为70MPa，便会形成微裂纹，这些裂纹会不断扩展，其扩展规律有着特定的模式。导电导热衰减的机理则是氧化与晶粒长大，在湿热环境中，银会被氧化生成绝缘的 Ag_2O ，同时晶粒会长大，导致晶界数量减少，电子散射增强，进而引发电阻变化^[3]。

4 提升纳米银浆芯片粘接可靠性的优化策略

4.1 材料优化

材料优化旨在从根源上提升纳米银浆的本征性能，为芯片粘接可靠性筑牢基础。复合改性方面，引入石墨烯或碳纳米管进行增强。添加0.5%-1%的石墨烯，凭借其独特的二维结构，不仅能有效抑制裂纹扩展，还可使粘接强度提升25%，导热系数增加18%，显著改善粘接层的力学与热学性能。银颗粒表面修饰采用硅烷偶联剂，修饰后颗粒与基板表面羟基形成稳定化学键，界面结合强度从18MPa大幅提升至28MPa，同时增强了抗氧化能力，在湿热老化2000h后，电阻增幅严格控制在50%以内。助剂调控通过复配分散剂与烧结助剂实现。采用PVP与十二烷基苯磺酸钠按质量比2:1复配，分散稳定性提升40%，确保银颗粒均匀分散。添加0.3%的纳米二氧化硅作为烧结助剂，可降低烧结温度至160℃，有效减少热应力对粘接层的影响，使银层孔隙率降至3%以下，进一步提升粘接层的致密性与可靠性。

4.2 工艺改进

工艺改进聚焦于精准控制与过程优化，以提升芯片粘接质量。界面预处理采用等离子清洗与喷砂相结合的方式。等离子清洗可高效去除基板表面油污与氧化层，使接触角从85°降至30°，增强表面润湿性；喷砂处理将基板表面粗糙度精准控制在0.8μm，增强机械咬合作用，使粘接强度提升30%。固化工艺引入闭环温控系统，实时监测温度场分布，确保芯片各区域温差小于5℃，避免因温度不均导致的应力集中。同时采用分步加压策略，升温阶段加压0.3MPa，保温阶段增至0.6MPa，有效提升银层致密性^[4]。在线质量监测利用机器视觉检测涂覆厚度均匀性，当偏差超过1μm时自动报警，结合超声检测精准识别内部气泡，检测准确率高达98%，及时发现并纠正工艺缺陷，确保粘接质量稳定可靠。

4.3 设计增强

设计增强从结构与封装角度出发，全方位提升芯片粘接可靠性。界面过渡层设计采用镍-金复合镀层，镍层厚度5μm可有效缓解芯片与基板间的热膨胀系数差异带来的一系列问题，减少热应力对粘接层的破坏；金层厚度0.5μm能提升浸润性，使界面剥离失效循环次数从800次大幅增至1500次。封装结构优化采用柔性缓冲设计，在芯片边缘设置厚度10μm的聚酰亚胺缓冲层，可吸收60%的热应力与振动能量，显著降低银层开裂风险，降低比例达70%，有效增加了增强芯片在复杂环境下的抗冲击能力。热管理强化通过优化散热路径实现，在基板底部设置铜质散热片，结合纳米银浆的高导热性，使芯片工作温度降低25℃，有效减缓高温老化导致的性能衰减问题，延缓老化速度超50%。针对高功率器件，采用双面散热设计，进一步提升热可靠性，确保芯片在长期高负荷运行下保持稳定性能。

结束语

纳米银浆在芯片粘接领域的应用价值获行业认可，但烧结后的可靠性问题是其产业化核心瓶颈。研究表明，银颗粒分散性与烧结活性、固化温度与界面预处理、服役环境的温湿度循环等因素共同影响粘接层可靠性。界面剥离和银层开裂是主要失效模式，热应力累积与微观缺陷扩展是关键机理。

参考文献

- [1]孙鑫,金家富,闵志先,等.多芯片组件功率芯片粘接失效分析及工艺改进[J].电子工艺技术,2025,46(2):15-18.
- [2]王伟忠,刘聪聪.芯片粘接对MEMS加速度计性能影响分析[J].微纳电子技术,2023,60(8):1282-1287.
- [3]王世楠,万永康,闫辰侃,等.叠层芯片粘接强度与剪切强度试验研究[J].现代电子技术,2022,45(18):7-10.
- [4]雷佳蕊,于春和,文弋,等.改进U-Net的芯片粘接区空洞缺陷检测模型[J].半导体技术,2025,50(8):843-850.