

Ag-In 复合焊膏的高温抗电化学迁移行为

张博雯, 王微, 冯浩男, 赵志远, 鲁鑫焱, 梅云辉

(天津工业大学, 天津, 300387)

摘要: 低温烧结纳米银焊膏具有优越的热、电和力学性能, 成为宽禁带半导体器件封装互连的关键材料之一, 高服役温度下, 烧结银的氧化和分解会引起电化学迁移的发生, 可能导致电子器件的短路失效. 在纳米银焊膏中添加氧亲和力更高的铜颗粒, 采用竞争氧化的思路可以抑制烧结银的电化学迁移. 与烧结纳米银焊膏 (382 min) 相比, 烧结 Ag-3In 和 Ag-5In (质量分数, %) 焊膏的电化学迁移寿命提高至 779 和 804 min, 提高约 1 倍; 分析了铜粉对烧结银在高温干燥环境中电化学迁移失效的抑制机理. 服役过程中, 铜颗粒优先于银颗粒与氧气发生反应生成 In_2O_3 , 从而抑制了烧结银的氧化、分解和离子化过程, 显著提高了烧结银的电化学迁移失效时间, 与此同时, 与烧结银焊膏相比, 烧结 Ag-1In 与 Ag-3In (质量分数, %) 焊膏的抗剪强度分别提升了 30.92% 和 32.37%. 结果表明, 纳米铜粉的引入可以显著提高烧结银的电化学迁移寿命.

创新点: (1) 烧结 Ag-3In 和 Ag-5In 焊膏的电化学迁移寿命提高约 1 倍.
(2) 铜颗粒优先于银颗粒与氧气发生反应抑制了烧结银的电化学迁移失效.
(3) 烧结 Ag-1In 与 Ag-3In 焊膏的抗剪强度分别提升了 30.92% 和 32.37%.

关键词: 电化学迁移; 纳米银焊膏; 抗电迁移 Ag-In 焊膏; 封装互连可靠性

中图分类号: TG 492 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230613009

0 序言

近年来, 以碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 为代表的第三代半导体材料具备高禁带宽度、高热导率等优势, 可有效突破传统硅基功率半导体器件及其材料的物理极限, 保障电动汽车的高可靠运行, 受到了广泛关注^[1-3]. 基于对宽禁带半导体器件封装互连界面热、电、力学性能的综合考虑, 以纳米银焊膏为代表的低温烧结互连技术得到了广泛的发展^[4-7]. 银作为一种极易发生电化学迁移 (ECM) 的金属, 在功率模块工作过程中产生枝晶结构, 引起短路失效, 这对功率器件的封装可靠性提出了新的挑战^[8]. 前期烧结银电化学迁移失效的研究主要集中在低温潮湿环境中, 这与功率器件面临的高温干燥服役环境迥异^[9-10].

针对烧结银在高温干燥环境下的电化学迁移

行为, 研究者们也提出了多种抑制银电化学迁移失效的方法, 例如将银与铜进行合金化, 通过合金化抑制金属银的氧化, 从而延长其电化学迁移失效时间^[11]; 在纳米银焊膏中添加亲氧性更高的钯或硅颗粒, 抑制焊膏中银的氧化, 提高其抗电化学迁移能力^[12-13]. 然而钯作为贵金属之一, 成本较高, 且钯的引入在一定程度上降低了烧结纳米银焊膏的连接强度, 与此同时, 硅颗粒的添加虽然延长了电迁移失效的时间, 但其抗剪强度也下降了 28.9%. 综上可知, 现有抑制银电化学迁移失效的方法在提高电迁移失效时间的同时, 都引起了抗剪强度的下降, 因此亟需开发有效抑制高温电化学迁移失效的纳米银焊膏, 满足功率器件的长寿命可靠服役要求.

文中在纳米银焊膏中引入具有较高氧亲和度的纳米铜颗粒, 提高烧结银的电化学迁移失效时间. 首先探究了烧结银和烧结 Ag-In 焊膏的电化学迁移行为, 分析了铜颗粒的引入对烧结银焊膏电迁移寿命的影响; 通过对比纳米银和 Ag-In 焊膏的热力学性能和烧结后的物相转变, 探究烧结 Ag-In 焊

膏的抗电化学迁移失效机制;最后探究了烧结银和烧结 Ag-In 焊膏的力学性能及对应的微观结构演变,分析钢颗粒的引入对封装互连强度的影响.在银焊膏中添加纳米钢颗粒,为提高烧结银焊膏的封装互连可靠性提供了新的方法.

1 试验方法

1.1 纳米银焊膏和 Ag-In 焊膏

使用的纳米银焊膏主要由纳米银颗粒、稀释剂、分散剂和粘合剂组成,固含量约为 88 % (质量分数)^[12, 14]. Ag-In 焊膏的制备流程:将直径为 100 nm 的钢粉加入到纳米银焊膏中,通过超声震荡和高速搅拌使二者混合均匀,从而得到不同掺杂比例的 Ag-In 焊膏.

1.2 电化学迁移试验

电迁移试验的基板材料为性能优异的绝缘衬底氧化铝陶瓷基板,该陶瓷基板的尺寸为 30 mm ×

30 mm. 如图 1a 所示,在氧化铝陶瓷基板表面覆盖一层 Kapton 胶带,该 Kapton 胶带品牌选用德意胶带,参考已有文献的尺寸,其厚度采用 80 μm ^[12];利用激光切割机 (LPKF ProtoLaser S4, 精度为 $\pm 1.98 \mu\text{m}$) 将基板表面的胶带切割成中间间距为 1 mm 的梳形对称结构,两端为电极,随后撕下切割部分的 Kapton 胶带,将纯银焊膏和不同配比的 Ag-In 焊膏涂抹在未覆盖 Kapton 胶带的区域,整个胶带撕下,样品放置在加热台上进行烧结.烧结条件如图 1b 所示,样品烧结完成后冷却至室温,烧结后试样如图 1a 所示,进行电迁移试验.

电迁移试验的电压设置为 400 V,温度为 400 $^{\circ}\text{C}$,将烧结完成的试验样品放置在如图 1c 所示的电迁移试验台上,样品电极的一端接 400 V 电压,另一端连接电流表,以监测试验过程中的电流变化.根据前期研究结果,当电流值为 1 mA 时,判定该样品短路失效,电流变化到 1 mA 所需的时间即为电化学迁移的失效寿命^[15].

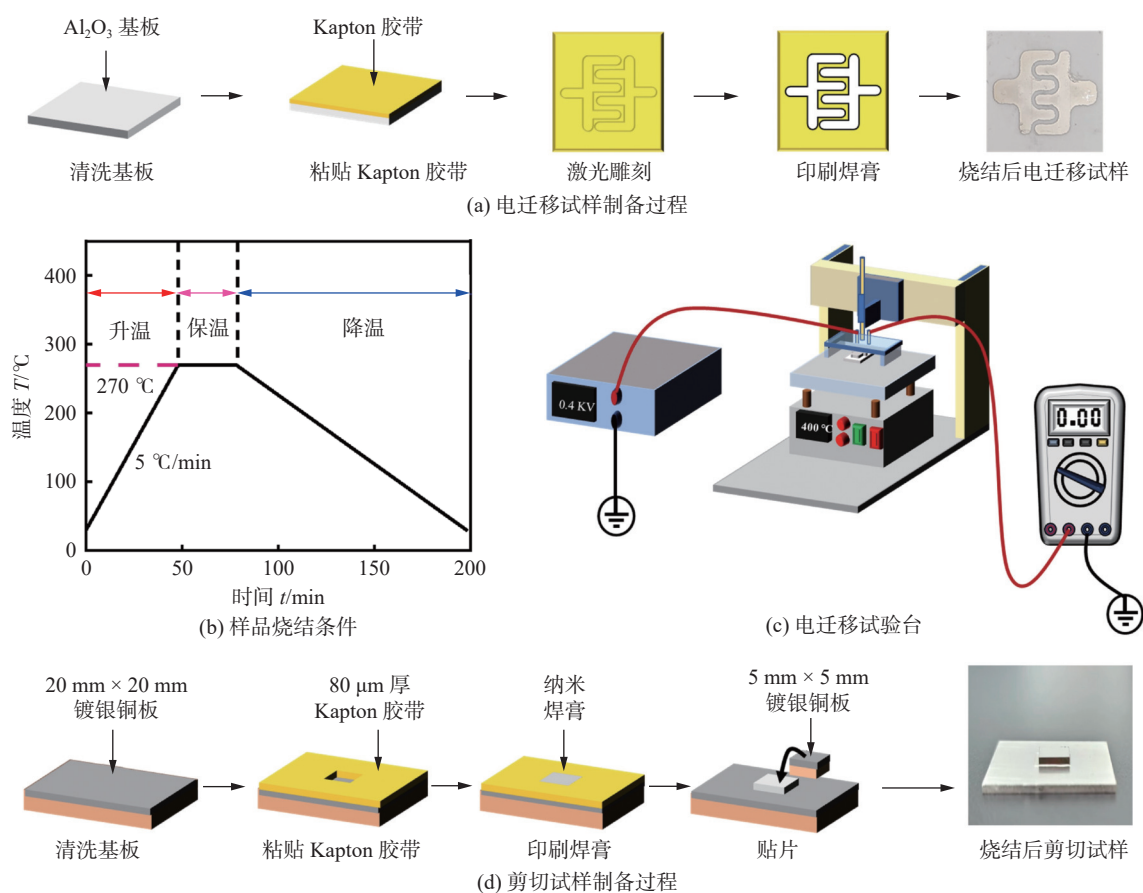


图 1 试样制备及试验测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen preparation and experimental testing. (a) electrochemical migration specimen preparation process; (b) sample sintering conditions; (c) electrochemical migration test bench; (d) shear specimen preparation process

1.3 剪切试验

选用尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的镀银铜板作为下基板, 尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的镀银铜板作为上基板, 其中铜基板的厚度约为 1 mm , 镀银层的厚度约为 $10\text{ }\mu\text{m}$. 抗剪强度测试样品的制备流程如图 1d 所示. 首先将准备好的基板进行超声振荡清洗, 在下基板表面一侧覆盖 $80\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 Kapton 胶带; 将纯银焊膏和不同配比的 Ag-In 焊膏印刷在基板表面, 随后撕下 Kapton 胶带, 下基板表面覆盖厚度为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的焊膏层; 最后将清洗干净的上基板平稳的覆盖在下基板表面的焊膏层上, 形成三明治结构的连接试样, 将样品放在加热台进行烧结, 烧结条件如图 1b 所示, 以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率从室温加热至 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温 30 min 后, 样品自然冷却至室温, 得到剪切试验所需的样品, 样品烧结后的形貌如图 1d 所示. 纯银样品以及 3 种配比的 Ag-In 烧结连接样品各制备 5 份, 取平均抗剪强度值进行比较, 评估其连接性能.

1.4 微观形貌与成分分析

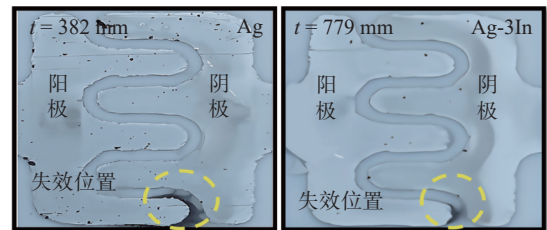
通过光学显微镜 (OM, BX51M) 对烧结银电极以及烧结 Ag-In 电极短路失效后的微观形貌进行分析, 观察银桥的生长方向. 通过 X 射线衍射仪 (XRD, D8 DISCOVER) 对烧结银焊膏以及烧结 Ag-In 焊膏试验后的组分及结晶度进行分析. 采用综合热分析仪 (TG-DSC, STA 449F5) 分析银焊膏和 Ag-In 焊膏的热力学性能, 通过自制剪切设备 (IBTC-5000) 测量烧结连接样品的抗剪强度, 通过扫描电子显微镜 (SEM, Hitachi S4800) 对剪切样品进行微观形貌分析.

2 结果与讨论

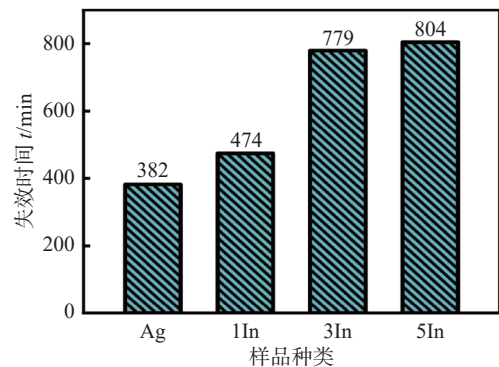
2.1 烧结银和 Ag-In 焊膏的电化学迁移行为

铜粉的引入对烧结纳米银焊膏电化学迁移寿命的影响, 如图 2 所示, 当外加电压为 400 V , 测试温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 烧结银样品的失效时间为 382 min . 当在纳米银焊膏中掺杂 1In 粉时, 电化学迁移寿命提高至 474 min , 表明铜粉的引入能够有效延长电化学迁移失效时间; 当铜粉的掺杂比例继续提高至 3% 和 5% 时, 烧结 Ag-In 样品的电化学迁移寿命显著提高至 779 和 804 min . 高温电迁移试验结果表明, 随着铜粉掺杂比例的上升, 电迁移的失效时间得到了显著提高. 与烧结纳米银焊膏相

比, 烧结 Ag-3In 和 Ag-5In 焊膏的电化学迁移失效时间均提高了约 1 倍, 烧结纳米银焊膏和 Ag-3In 焊膏的失效形貌, 如图 2 所示. 图 2a 中左侧为梳形电极的阳极, 右侧为阴极, 黄线标注为样品的电迁移失效区域. 从图中可以看出, 阳极与阴极间出现了明显的银桥, 银桥从阴极开始生长, 向阳极延伸, 从而导致电迁移试样的短路失效. 值得关注的是, 烧结纳米银焊膏的银桥扩散区域明显大于烧结 Ag-3In 焊膏, 进一步证明了铜粉的引入有效抑制烧结纳米银焊膏电化学迁移.



(a) 失效形貌



(b) 失效时间

图 2 ECM 失效形貌以及失效时间

Fig. 2 ECM failure photo and failure time diagram. (a) ECM failure photo; (b) failure time diagram

为了观察样品失效位置的微观形貌, 通过光学显微镜以及 SEM 对烧结纳米银焊膏和 Ag-3In 焊膏的电化学迁移银桥进行了分析, 如图 3 所示, 从图中可以看出, 烧结银电化学迁移产生的银桥呈树枝状, 从阴极向阳极生长. 前期研究表明, 在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下, 烧结银在阳极氧化生成 Ag_2O , Ag_2O 在高温下进一步分解为 Ag^+ 和 O^{2-} , 在外加电场的作用下, Ag^+ 从阳极迁移到阴极, 并在阴极的电子形成金属银, 从而在阴极沉积形成银桥. 在此过程中, O^{2-} 则从阴极向阳极迁移, 保持电场中的电荷中性. 烧结银在高温和外加电场作用下不断发生氧化和分解反应, 随着 Ag^+ 的不断迁移和沉积, 银桥逐渐呈树状结构并连接两极, 导致电迁移试样的短路失效^[16].

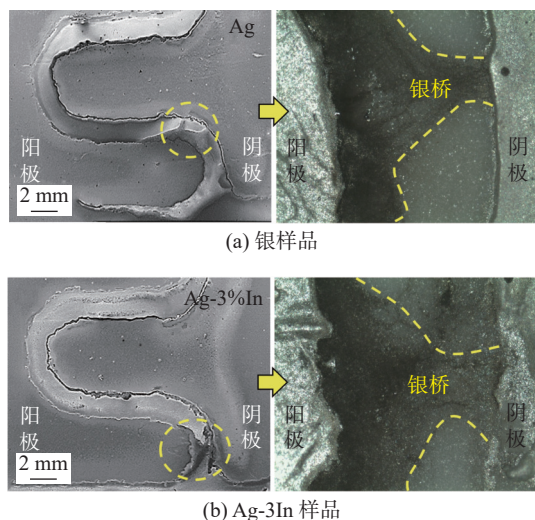


图 3 ECM 失效的 SEM 图像和 ECM 失效的 OM 图像
Fig. 3 ECM failure SEM images and ECM failure OM images. (a) Ag sample; (b) Ag-3In sample

2.2 烧结 Ag-In 焊膏的电化学迁移抑制机理

烧结银和 Ag-In 焊膏的电化学迁移行为研究表明, 钢粉的引入能够有效提高烧结银焊膏的电化学迁移失效时间. 为了验证烧结 Ag-In 焊膏的抗电化学迁移机理, 通过 XRD 探究了烧结银焊膏、烧结 Ag-In 焊膏试验后的物相变化, 如图 4 所示. 从图中可以看出, 烧结银焊膏显示出 4 个尖锐的衍射峰, 且衍射峰与银的标准卡片 PDF#04-0783 中的峰完全对应. 结果表明, 270 °C 保温 30 min 后纳米银焊膏中的有机物彻底挥发和分解, 纳米银焊膏已经全部转化为银单质. 同样的, 烧结 Ag-In 焊膏也显示出 4 个尖锐的衍射峰, 且衍射峰与纯银的 (111), (200), (220), (311) 4 个衍射峰完全拟合. 值得关注的是, 烧结 Ag-In 焊膏的所有衍射峰均未与钢的标准卡片 PDF#05-0642 中峰对应, 这是因为 Ag-In 焊膏中钢的掺杂量过少, 钢的衍射峰被银的衍射峰掩盖. 此外烧结 Ag-In 焊膏的 XRD 结果也表明, 钢粉的引入虽然显著提高了烧结银焊膏的电化学迁移寿命, 但并未影响焊膏的烧结特性. 为了探究烧结过程中钢粉的物相变化, 防止其衍射峰被银的衍射峰掩盖, 随后探究了烧结 Ag-40In 焊膏的晶体结构. 从图 4b 中可以看出, 烧结 Ag-40In 焊膏既出现了的银衍射峰, 同时也出现了氧化钢 (In_2O_3) 的衍射峰, 但并未观察到 Ag_2O 的衍射峰. 结果表明, 在高温服役过程中, 钢优先于银与氧气发生反应生成 In_2O_3 , 从而抑制了烧结银的电化学迁移失效.

通过 TG-DSC 对纳米银焊膏和 Ag-In 焊膏的

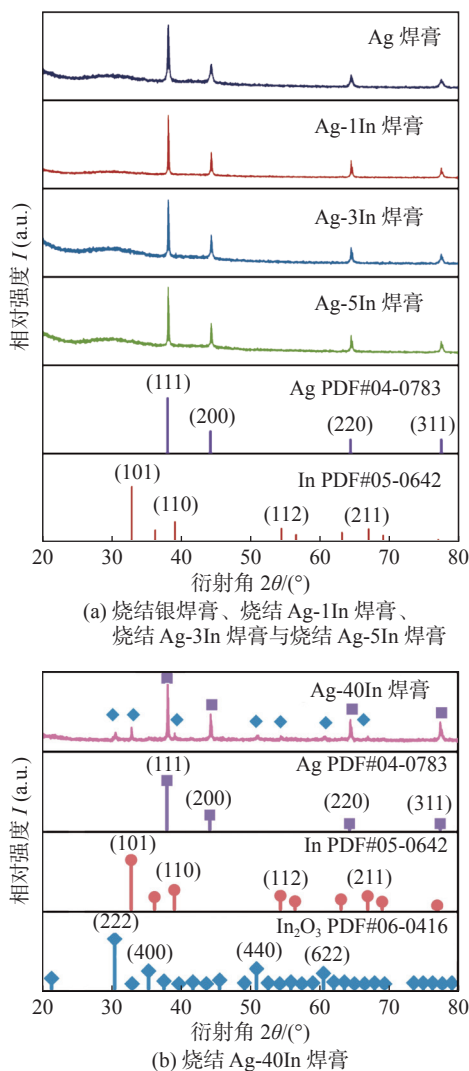


图 4 不同焊膏的 XRD 成分
Fig. 4 XRD composition analysis diagram of different pastes. (a) sintered Ag paste, sintered Ag-1In paste, sintered Ag-3In paste and sintered Ag-5In paste; (b) sintered Ag-40In paste

热力学性能进行分析, 以探究 Ag-In 焊膏的抗电化学迁移失效机制 (图 5). 图 5a 为纳米银焊膏的 TG-DSC 曲线, 从 TG 曲线可以看出, 纳米银焊膏在 120 ~ 220 °C 出现明显的失重, 主要是因为焊膏中的有机物在高温下开始快速的挥发和分解. 当温度提高至 220 ~ 280 °C 时, 纳米银焊膏的失重速率明显减缓, 是由于焊膏中的大部分有机物已经挥发和分解, 仅剩下小部分沸点较高的有机物在此阶段挥发和分解所致. 观察图 5a 的 DSC 曲线, 可以发现在 260 °C 时有向下的放热峰出现, 说明此时焊膏中的银发生了相变, 银由液态转变为固态. 当温度升高到 280 °C 后, 焊膏的重量趋于稳定, 没有观察到进一步失重, 纳米银焊膏的总失重约为 9.41%. 如图 5b 所示, 钢粉的添加提高了纳米银焊膏的固含

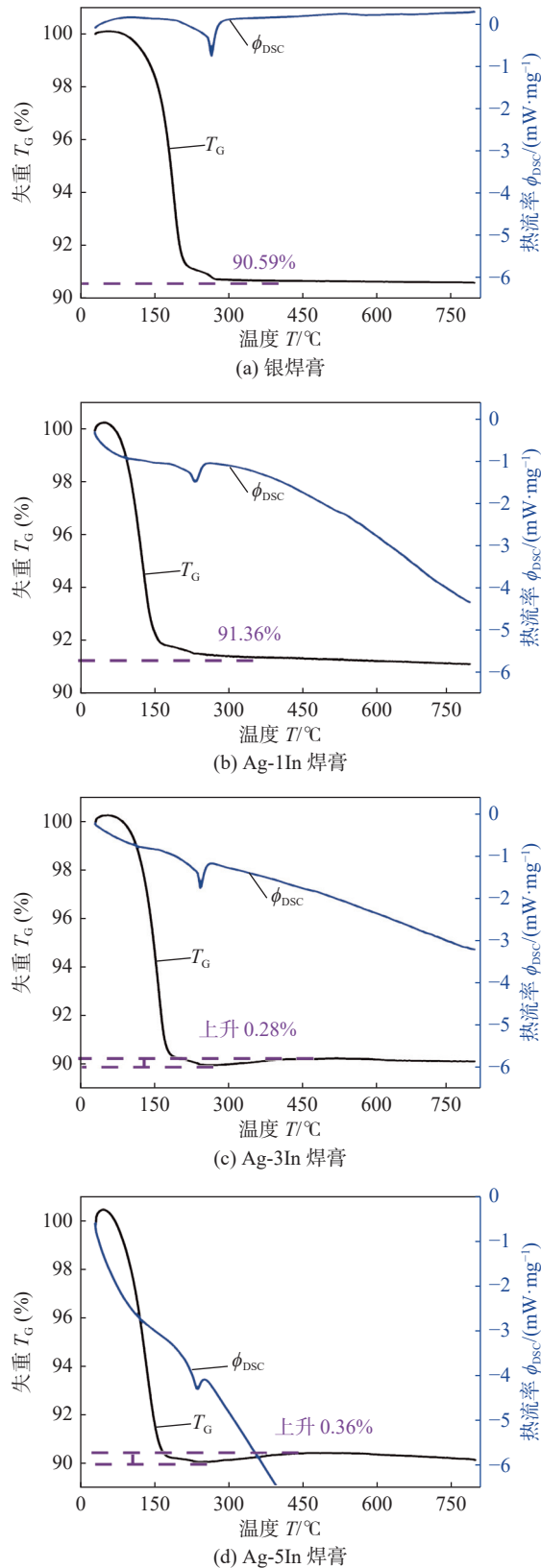


图 5 不同焊膏的 TG-DSC 曲线

Fig. 5 TG-DSC graph of different pastes. (a) Ag paste; (b) Ag-1In paste; (c) Ag-3In paste; (d) Ag-5In paste

量, 因此当温度升高到 280 °C 时, Ag-1In 焊膏的失重约为 8.64%, 低于纳米银焊膏的失重. 同样的,

Ag-3In 焊膏和 Ag-5In 焊膏在 280 °C 时均达到了最大失重值, 如图 5c, 5d 所示. 通过观察图 5 的 DSC 曲线, 可以发现均有放热峰出现, 但相比于银焊膏在 260 °C 出现放热峰, 不同比例的 Ag-In 焊膏的放热峰却偏移至 240 °C 附近, 主要是由于铜的添加导致结晶温度降低所致.

值得注意的是, 当温度从 280 °C 提高到 410 °C 时, Ag-3In 焊膏和 Ag-5In 焊膏的总重量又出现了小幅度的上升, 分别上升了 0.28% 和 0.36%. 金属铜通常在 100 °C 左右开始出现氧化现象, 在表面形成极薄的 In_2O_3 膜. 在 Ag-In 焊膏中, 有机物在 280 °C 充分挥发和分解, 当温度高于 280 °C 以上时, 少量的金属铜开始氧化生成 In_2O_3 , 从而导致了总重量的小幅度上升. 如图 5c, 5d 所示, 随着铜粉掺杂比例的上升, Ag-In 焊膏总重量的上升幅度也逐渐增加, 表明生成的 In_2O_3 逐渐增加. 当温度升高到 410 °C 以上时, Ag-3In 焊膏和 Ag-5In 焊膏的总重量不再发生变化, 说明 In_2O_3 的含量达到最大值, 金属铜不再继续发生氧化.

前期研究表明, 烧结银焊膏的电化学迁移主要由高温下银的氧化和分解引起^[16]. 通过查阅资料可知, 铜的标准电极电位为 -0.34 V, 而银的标准电极电位为 +0.79 V^[17]. 根据标准电极电势表的分析可知, 标准电极电位越小, 其还原性越强, 越容易被氧化, 因此金属铜比银更容易被氧化^[18]. 金属铜的氧化温度远低于银, 在服役过程中, 铜优先于银与氧气发生反应生成 In_2O_3 , 从而抑制了烧结银的氧化、分解和离子化过程, 显著提高了烧结银的电化学迁移失效时间. 与此同时, 金属铜氧化生成的 In_2O_3 具有低离子导电性, 在焊膏边缘区域形成了一层钝化的保护膜, 进一步阻止 O 元素在焊膏内部的扩散, 从而降低了银与 O 原子的接触, 抑制了烧结银的电化学迁移失效^[19]. 图 2 所示的电迁移失效时间演变也进一步验证了在电迁移测试中, 金属铜优先于银氧化, 铜粉的掺杂比例越大, 生成的 In_2O_3 越多, 烧结银的电化学迁移抑制效果越显著.

2.3 烧结银和 Ag-In 焊膏的力学性能

在前期的抗电迁移研究中, 硅和钯的添加虽然有效的延长了烧结银焊膏的抗电化学迁移时间, 但连接强度却出现了一定程度的下降, 降低了原有的力学性能, 限制了烧结银在宽禁带半导体器件封装互连中的应用^[12, 16]. 烧结 Ag-In 焊膏虽然显著提高

了电迁移寿命,但其连接强度的演变依然十分关键.为了分析烧结 Ag-In 焊膏的连接强度演变,分别制备了烧结 Ag, Ag-1In, Ag-3In 和 Ag-5In 互连试样,并对其进行了剪切测试,测试结果如图 6 所示.无压烧结条件下,烧结银焊膏的抗剪强度较低,仅达到 20.7 MPa,随着钢粉的掺杂量从 1% 提高到 3%,烧结 Ag-In 焊膏的抗剪强度从 27.1 MPa 提高至 27.4 MPa.与烧结银焊膏相比,烧结 Ag-1In 与 Ag-3In 焊膏的抗剪强度分别提升了 30.92% 和 32.37%;进一步提高钢粉的掺杂量,烧结 Ag-5In 焊膏的抗剪强度却降低为 18.2 MPa,表明过量钢粉的引入,会引起互连层抗剪强度的降低,这是因为过量的钢会与银反应生成 Ag-In 金属间化合物 Ag_7In_3 , Ag_7In_3 的硬度较大,韧性较差导致其抗剪强度的下降^[20].而掺杂钢粉比例较少的烧结 Ag-1In 和 Ag-3In 焊膏其生成的 Ag-In 金属间化合物较少,未对抗剪强度造成影响,反而由于少量钢颗粒的添加,颗粒间的颈向生长加剧,提高了烧结银的致密化程度,进而提高了其抗剪强度.综上所述,烧结 Ag-1In 与 Ag-3In 焊膏在显著提高电化学迁移失效时间的同时,反而提高了封装互连的强度,有效的避免了传统抑制电化学迁移失效方法带来的强度降低.

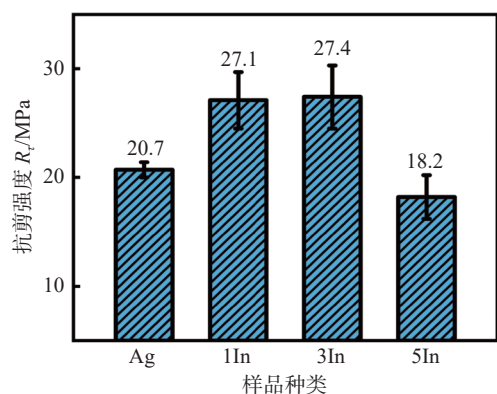


图 6 试样抗剪强度对比

Fig. 6 Comparison of the shear strength of specimens

为了验证烧结银和烧结 Ag-In 焊膏的连接强度演变,进一步分析了其微观结构演变.图 7 所示为烧结 Ag, Ag-1In, Ag-3In 以及 Ag-5In 样品的微观结构.从图 7a 中可以看出,在烧结银焊膏中,银颗粒聚集生长,并出现了明显的颈向连接.当掺杂 1% 的银粉时,烧结 Ag-In 焊膏中出现了明显的白色钢颗粒,如图 7b 所示,与此同时,颗粒之间的颈向生长加剧,颗粒的聚集生长更为明显,从而引起

了抗剪强度的增大.烧结 Ag-3In 焊膏中观察到了相同的现象,颗粒之间的聚集和颈向生长都更为明显(图 7c).由于钢的熔点 ($156.51\text{ }^{\circ}\text{C}$) 较低,烧结的过程中由固态转变为液态,可以有效促进银颗粒之间的连接,提高其抗剪强度^[21].从图 7d 中可以看出,当钢粉的掺杂量提高到 5% 时,钢颗粒明显增加,且有部分钢颗粒出现在表面,如图 7d 橙色区域所示,未能形成颈向生长,从而导致了抗剪强度的下降.综合电化学迁移失效时间和抗剪强度演变规律,Ag-1In 和 Ag-3In 焊膏均能有效兼顾电迁移寿命和连接强度的提升.

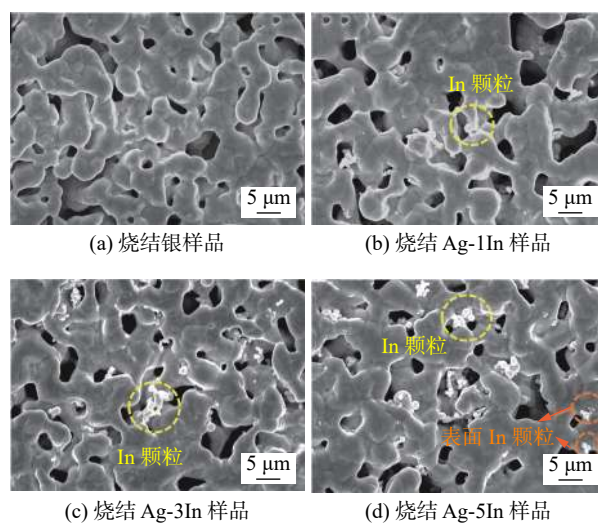


图 7 样品表面 SEM 形貌

Fig. 7 SEM image of sample surface. (a) sintered Ag sample; (b) sintered Ag-1In sample; (c) sintered Ag-3In sample; (d) sintered Ag-5In sample

3 结论

(1) 烧结 Ag-In 焊膏的电化学迁移时间明显高于烧结银焊膏,表明钢粉的引入能够有效延长电化学迁移失效时间.与烧结银焊膏相比,烧结 Ag-3In 和 Ag-5In 焊膏的电化学迁移失效时间均提高了约 1 倍.

(2) 服役过程中,金属钢优先于银颗粒与氧气发生反应生成 In_2O_3 ,从而抑制了烧结银的氧化、分解和离子化过程,显著提高了烧结银的电化学迁移失效时间.

(3) 与烧结银焊膏相比,烧结 Ag-1In 与 Ag-3In 焊膏的抗剪强度分别提升了 30.92% 和 32.37%,在提高电化学迁移失效时间的同时,显著增加了烧结焊膏的连接强度.

参考文献

- [1] Senecal P K, Leach F. Diversity in transportation: Why a mix of propulsion technologies is the way forward for the future fleet[J]. Results in Engineering, 2019, 4: 100060.
- [2] Nozawa S, Maekawa T, Yagi E, *et al.* Development of new power control unit for compact-class vehicle[C]//2010 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hiroshima, Japan: IEEE, 2010: 43-45.
- [3] Chen Y, Yu P, Zhong Y, *et al.* Progress in electrochemical etching of third-generation semiconductors[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2023, 12: 045004.
- [4] Yang H. Study on the preparation process and sintering performance of doped nano-silver paste[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2022, 61(1): 969 - 976.
- [5] Steppan J J, Roth J A, Hall L C, *et al.* A review of corrosion failure mechanisms during accelerated tests: Electrolytic metal migration[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1987, 134(1): 175.
- [6] 杨东升, 张贺, 田艳红, 等. 电子封装微纳连接技术即失效行为研究进展 [J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 126 - 136.
- Yang Dongsheng, Zhang He, Tian Yanhong, *et al.* Progress in the study of micro-nano connection technology, i. e., failure behaviour, in electronic packaging[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 126 - 136.
- [7] Lin L T, Zhang Y F, Li X. Study on the performance of silver paste sintered sealing joints for hermetic packaging[J]. China Welding, 2022, 31(1): 29-36.
- [8] Kohman G T, Hermance H W, Downes G H. Silver migration in electrical insulation[J]. The Bell System Technical Journal, 1955, 34(6): 1117 - 1147.
- [9] Li D, Mei Y H, Tian Y, *et al.* Doping low-cost SiOx ($1.2 < x < 1.6$) nanoparticles to inhibit electrochemical migration of sintered silver at high temperatures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830: 154587.
- [10] Lu G Q, Yang W, Mei Y H, *et al.* Mechanism of migration of sintered nanosilver at high temperatures in dry air for electronic packaging[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2013, 14(1): 311 - 317.
- [11] Zhang D, Zou G, Liu L, *et al.* Synthesis with glucose reduction method and low temperature sintering of Ag-Cu alloy nanoparticle pastes for electronic packaging[J]. Materials Transactions, 2015, 56(8): 1252 - 1256.
- [12] 李丹. 电子封装用烧结银抗电化学迁移的可靠性增强研究 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
- Li Dan. Study on reliability enhancement of resistance to electrochemical migration of sintered silver for electronic packaging[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [13] Ito T, Ogura T, Hirose A. Effects of Au and Pd additions on joint strength, electrical resistivity, and ion-migration tolerance in low-temperature sintering bonding using Ag₂O paste[J]. Journal of Electronic Materials, 2012, 41: 2573 - 2579.
- [14] 梅云辉. 低温烧结纳米银焊膏电迁移和粘接热弯曲性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- Mei Yunhui. Study on electrochemical migration and bonding thermal bending properties of low-temperature sintered nano-silver solder paste[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [15] 闫超一. 盐雾环境中烧结纳米银互连材料的电学迁移失效机理及抑制研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Yan Chaoyi. Study on electrochemical migration failure mechanism and inhibition of sintered nano-silver interconnecting materials in salt spray environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [16] 王迪. 高温环境下纳米 Ag-Pd 焊膏的抗电学迁移老化行为研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- Wang Di. Anti-electrochemical migration aging behavior of nano-Ag-Pd solder paste under high temperature environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [17] Hong H S, Kim G H, Hong M H, *et al.* Indium ion cementation onto aluminum plates in hydrochloric acid solutions: a kinetic perspective[J]. International Journal of Materials Research, 2014, 105(2): 177 - 182.
- [18] 陈栋勤. 标准电极电势表的作用 [J]. 彭城职业大学学报, 2004(5): 77 - 79.
- Chen Dongqin. The role of a standard electrode potential meter[J]. Journal of Pengcheng Vocational University, 2004(5): 77 - 79.
- [19] Yang C A, Wu J, Lee C C, *et al.* Analyses and design for electrochemical migration suppression by alloying indium into silver[J]. Journal of Materials Science:Materials in Electronics, 2018, 29: 13878 - 13888.
- [20] Yang C A, Kao C R, Nishikawa H. Development of die attachment technology for power IC module by introducing indium into sintered nano-silver joint[C]//2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2017: 1974-1980.
- [21] Tsai C H, Huang W C, Chew L M, *et al.* Low-pressure micro-silver sintering with the addition of indium for high-temperature power chips attachment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4541 - 4553.

第一作者: 张博雯, 博士, 副教授; 主要研究方向为宽禁带半导体器件的高可靠封装互连; Email: bowenzhang@tiangong.edu.cn.

通信作者: 梅云辉, 博士, 教授; Email: meiyunhui@163.com.

(编辑: 郑红)