

# 低温烧结银与金基界面互连研究进展

汪智威, 林丽婷, 李欣

(天津大学, 天津, 300072)

**摘要:** 烧结银具有高导热、高导电以及良好的力学性能, 可以实现低温烧结、高温应用, 在高温高功率电子器件中有良好的应用前景。目前烧结银与金基界面互连仍存在着抗剪强度低、可靠性差等问题。文中首先比较烧结银与不同界面互连机制和互连性能, 着重讨论和归纳烧结银-金互连机制和关键影响因素, 然后对现有烧结银-金互连工艺进行分析总结, 从烧结工艺、金基界面制备与可靠性等方面展开, 最后通过对银-金互连领域研究成果的综述, 对银-金互连课题未来发展方向进行了展望。

**创新点:** (1) 分析影响烧结银-金互连的因素及作用机理。  
(2) 总结归纳改进烧结银-金互连的方法及研究进展。

**关键词:** 烧结银; 界面互连; 银-金接头; 可靠性

**中图分类号:** TG 425      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230613010

## 0 序言

近年来, 相比于硅基 (Si) 器件, 第三代半导体如碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等器件, 由于具有更大的禁带宽度和击穿场强, 更高的导热性、耐热性, 越来越广泛地应用在电动汽车和航空航天等领域<sup>[1]</sup>。为满足第三代半导体器件的高温、高功率密度的可靠应用, 相应封装互连材料必须具有热、电和力学性能的良好匹配。新型连接材料—烧结银焊膏, 利用微/纳米银颗粒在加热或加压条件下, 可以相互扩散, 并形成致密多孔烧结银结构的特点, 满足了低温烧结 ( $\leq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和高温应用 ( $\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 的应用需求, 同时烧结后具有良好的力学强度、热、电和可靠性, 在许多应用场景中已经代替无铅焊料, 成为首选的互连材料<sup>[2-4]</sup>。

在半导体器件封装中, 通过互连材料实现芯片与基板之间的机械和电气连接, 互连接头质量密切影响着器件的寿命。影响互连质量的因素除了材料本身外, 还有界面连接质量这一关键因素, 而界面处多为异种金属之间的连接, 往往易出现分层、裂纹等缺陷。正如烧结银焊膏的主要成分为银, 而基板表面通常为铜铝材料, 同时为避免其氧化, 提高

可焊性, 工业上又常对其进行镀银、镀镍或镀金 (镀金之前普遍需要先预镀镍层) 的表面处理<sup>[5]</sup>, 因此烧结银与不同金属界面之间的互连已成为研究热点, 其中银-金界面互连近些年受到了更多的关注, 这是由于金基界面具备高导电性和低接触电阻等特性, 镀金基板已逐渐被应用, 以提升半导体器件的性能。

已有学者进行对比试验发现, 烧结银与金基界面的互连性能远不如烧结银与银基界面<sup>[6]</sup>, 目前烧结银-金互连可靠性仍存在诸多质疑与问题, 受到业内学者广泛关注。文中由介绍烧结银与不同表面互连机制入手, 阐明烧结银-金互连的问题与挑战, 从接头互连工艺、接头服役可靠性等方面对烧结银-金接头的研究现状总结归纳, 旨在更好解决烧结银-金基界面互连问题。

## 1 烧结银与金属化界面互连机制

有学者曾对两种材料间的连接机制进行总结, 一般可以分为物理、机械、静电、扩散以及化学键连接等<sup>[7-8]</sup>。表面金属化结构的不同、烧结工艺的差异都会造成烧结银与界面连接机制的不同。

### 1.1 烧结银与裸铜界面互连

烧结银中的有机物体系需要烧结气氛中一定

的氧分压才能热分解,但铜在该环境下即生成氧化膜.不少学者认为烧结银与铜表面依靠 Ag-Cu 金属键形成互连,而铜基板表面氧化膜阻碍键合. Ide 等人<sup>[9]</sup>采用纳米银-有机壳覆盖的银焊膏,在辅助烧结压力 5 MPa 的条件下,还原铜表面氧化物,制备得到互连性能良好的银-铜接头.有试验对比空气和低真空环境烧结得到的银-铜接头的服役可靠性,空气烧结接头由于存在氧化物层,加剧接头内因热膨胀系数不同而产生的热应力,导致其可靠性远低于低真空环境烧结接头<sup>[10]</sup>.但 Du 等人<sup>[11]</sup>通过透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 观察发现 (图 1),空气气氛烧结得到的银-铜接头形成了 Ag-Cu<sub>2</sub>O 化学键和 Ag-Cu 金属键,由于晶格常数差异,学者认为前者对接头互连贡献更大.

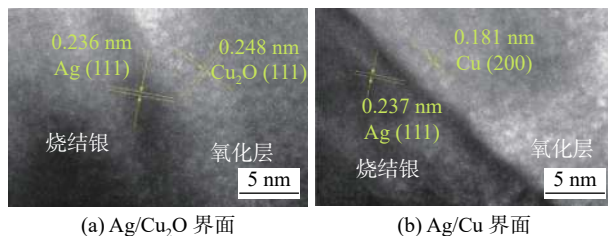


图 1 烧结银与铜及其氧化物层的界面晶格<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Lattice images of the interface between sintered Ag and oxide layer. (a) Ag/Cu<sub>2</sub>O interface; (b) Ag/Cu interface

## 1.2 烧结银与银基界面互连

烧结银可以实现与银基表面的良好互连,因为二者晶格常数相同,Ag 原子可在银基表面外延生长,无压烧结下,接头抗剪强度可达到 70 MPa,断裂形式通常为穿晶断裂<sup>[12-13]</sup>.有学者观察烧结银-银基界面接头断面,断裂位置出现在烧结银靠近上焊盘或下焊盘界面的烧结银内部,表明烧结银与银基界面的连接强度与烧结银的内聚强度相当<sup>[14]</sup>.此外,烧结银与银基界面互连的接头具有更高可靠性:有学者将烧结银-银接头置于 200~300 °C 的环境下进行 50 h 的高温老化,发现银-银接头连接层进一步致密化,抗剪强度不降反升<sup>[15]</sup>.将烧结银-银基界面接头放置在 300 °C 环境中,1 000 h 后仍保持高于 30 MPa 的抗剪强度<sup>[16]</sup>,将这一现象归因于相较于其它类型接头,烧结银与银基界面互连具有最高界面连接比和最小接触角,能有效增加裂纹扩展面积,减小界面的应力集中,如图 2 所示<sup>[17]</sup>.

## 1.3 烧结银与金基界面互连

早在 2008 年,有学者在块状金表面进行烧结

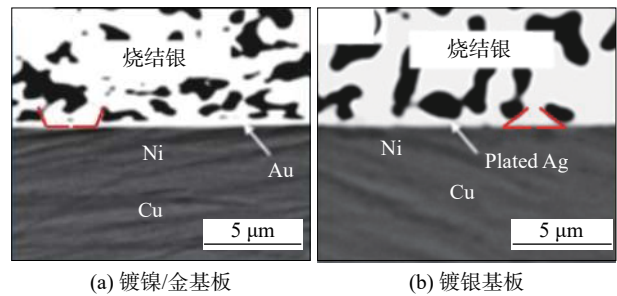


图 2 烧结银与不同界面互连接头<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Sintered Ag joints on different metallization. (a) Ni/Au plated substrate; (b) Ag plated substrate

银互连,由于银与金晶格常数接近 (银为 0.408 6 nm,金为 0.407 9 nm),银-金界面处的微观组织形貌如图 3 所示,银纳米颗粒沿金层晶粒取向形成外延层,实现连接<sup>[18]</sup>.2014 年, Paknejad 等人<sup>[19]</sup>在 300 °C 高温老化 24 h 的烧结银-金接头中,同样观察到这一现象 (图 3a).另外,进行 TEM 表征,发现在接头界面位置,Ag 和 Au 原子沿晶界发生了剧烈互扩散现象 (图 3b),可知烧结银-金互连主要依靠银-金间互扩散实现.

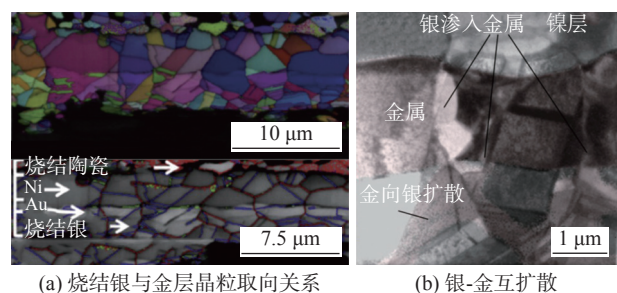
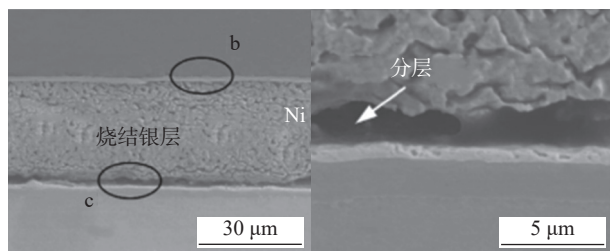


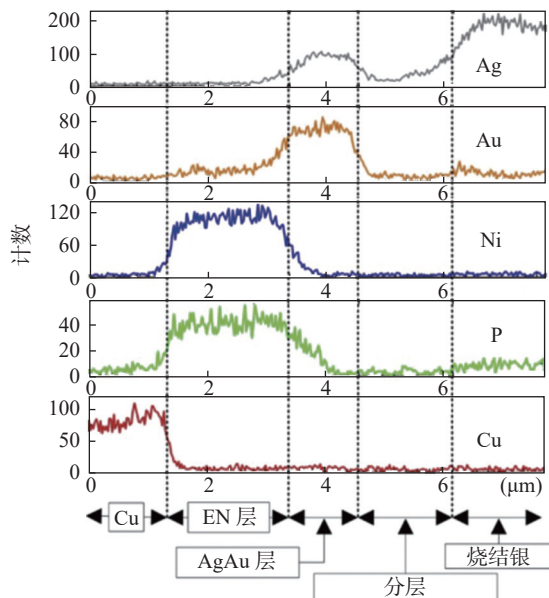
图 3 银-金界面处的微观组织形貌<sup>[19]</sup>

Fig. 3 Interfacial microstructure at Ag-Au metallization. (a) orientation relationship between Ag layer and Au layer; (b) TEM image of Ag-Au interdiffusion

有部分学者关注银-金接头中互扩散现象的影响因素. Xu 等人<sup>[20]</sup>对比化学镀和电镀得到金基表面,化学镀的表层金晶粒小于 100 nm,远小于电镀表面金晶粒尺寸,烧结后,前者互连界面处产生连续分层 (delamination region),烧结银-金接头如图 4 所示,这是因为小的金晶粒具有更多晶界,为 Ag 原子提供更多扩散至金镀层的通道,Ag 原子大量溶于金层最终导致分层. Lin 等人<sup>[21]</sup>利用分子动力学模拟设计对比金层晶粒取向对银金扩散的影响,相同时间下,Ag 原子在金的高角度模型中的平均扩散距离是 Ag 原子在低角度模型中的 4 倍,在烧结互连时,金层表面的高角度晶界可作为 Ag 原子的高速扩散通道,促进 Ag 原子迁移.



(a) 微观形貌



(b) 界面元素分布

图 4 烧结银-金接头<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Sintered Ag-Au joints. (a) interfacial microstructure; (b) the distribution of element

## 2 烧结银与金基界面互连问题与挑战

### 2.1 不平衡互扩散

以烧结温度为 300 °C 为例, 银在金中的扩散系数为  $3.42 \times 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 远大于银在银中和金在银中的扩散系数 (二者分别为  $5.99 \times 10^{-18}$  和  $4.67 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{s}$ ), 保温 10 min, Ag 原子在银基体的扩散长度为 0.60 nm, 而在金基体的扩散长度可达到 1.43 nm. 烧结过程中, 靠近银-金界面处的 Ag 原子快速迁移进入金层, 而距离界面较远的 Ag 原子来不及补充空位, 导致互连界面处产生致密层 (void-free layer), 即银-金固溶层, 在致密层上方形成高孔隙层 (high-porosity layer), 一旦孔隙之间连续形成分层 (delamination) 严重恶化接头性能. 该现象同样出现在烧结银-金接头老化过程中, Paknejad 等人<sup>[19]</sup> 在 300 °C 高温老化 500 h 后, 烧结银-金接头中伴随镀金层逐渐溶解烧结银中, 界面位置无孔隙层增厚, 其上方形成分层, 如图 5 所示, 接头的抗

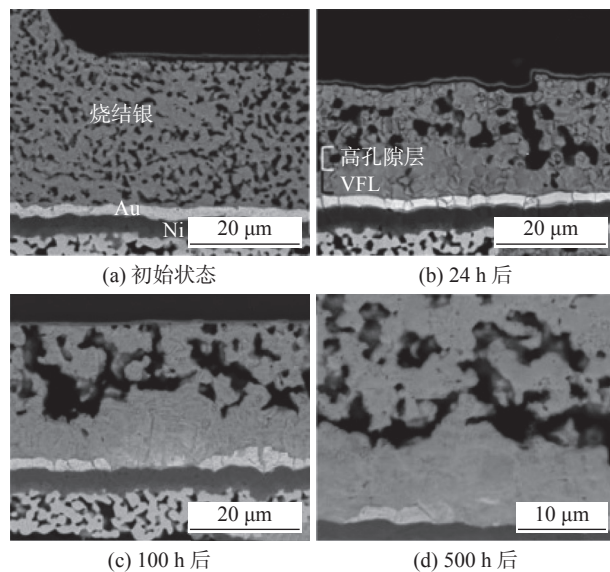
图 5 高温老化接头形貌变化<sup>[19]</sup>

Fig. 5 Microstructure evolution of sintered Ag-Au joints during high-thermal aging. (a) initial stage; (b) after 24 h; (c) after 100 h; (d) after 500 h

剪强度由初始状态下的 22.5 MPa 下降至 7.5 MPa.

Chen 等人<sup>[22]</sup> 将烧结银-金接头置于 250 °C 环境中进行老化, 银-金接头间存在剧烈互扩散, 高温作用下, 原子运动加剧, 老化 1 000 h 后, 出现“吃金”现象, 即 Au 原子已全部溶入烧结银, 接头形貌变化和界面反应如图 6 所示, 与此同时, 由于无金层阻挡作用下, 镀镍层和铜层也发生一定程度的扩散.

### 2.2 镍层氧化

在金基表面化处理过程中, 为提高金层与铜基体结合力, 并抑制二者互扩散, 在镀覆金之前, 一般镀 3 ~ 7 μm 的镍层<sup>[23]</sup>. 镀金液对镍层具有腐蚀性, 如果工艺不当, 往往会在表面造成黑板和针孔等缺陷<sup>[24]</sup>. 除银-金过渡互扩散外, 由于互连后的金层为疏松多孔结构, 镀镍层直接与连接层接触, 镍层对接头互连存在一定影响. 有学者对比基板镀镍层有无针孔 (pinhole) 缺陷的烧结银接头的互连性能, 二者初始状态下强度相同, 但经过 500 h 的 250 °C 高温老化试验, 无针孔缺陷的基板烧结银接头抗剪强度下降 17%, 有缺陷基板对应接头强度下降 26%, 烧结银-金接头断面电子显微探针结果, 如图 7 所示, 认为镀镍层的针孔缺陷为氧气提供快速扩散通道, 导致镀镍层氧化, 镍氧化物成为断裂敏感区, 剪切试验中, 接头发生脆性断裂<sup>[25]</sup>. 同样有学者通过 XPS 手段观察到, 由于化学浸金过程中金层产生孔隙, 烧结过程中 Cu 和 Ni 原子在金表面聚集形成氧化物, 恶化接头性能<sup>[26]</sup>.

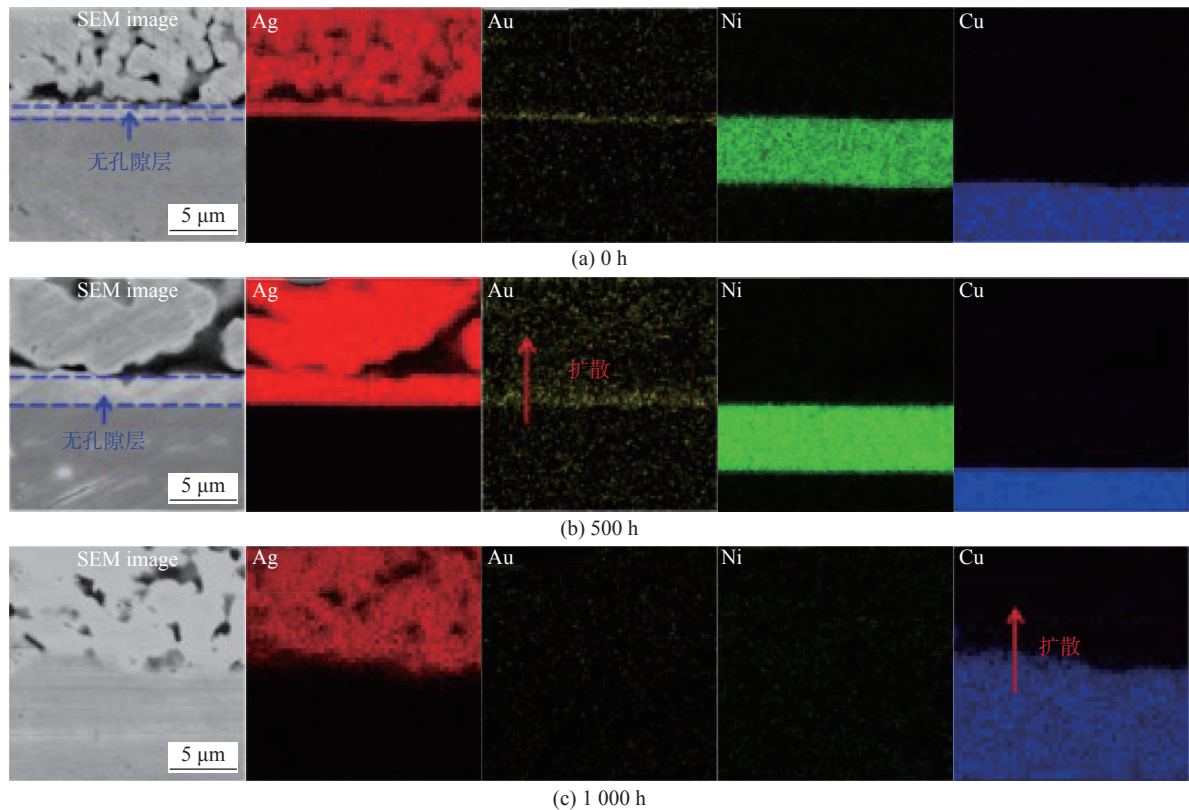
图 6 高温老化下接头形貌变化和界面反应<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Microstructure evolution and interfacial reaction of sintered Ag-Au joints during high thermal aging. (a) 0 h; (b) 500 h; (c) 1000 h

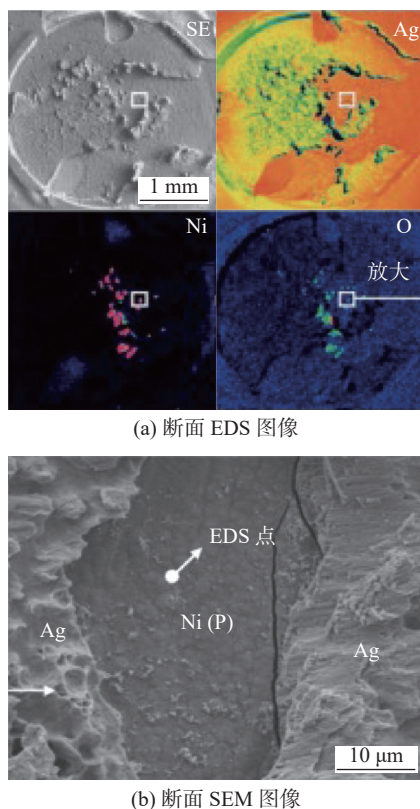


图 7 烧结银-金接头断面

Fig. 7 Fracture surface of sintered Ag-Au joint. (a) EDS image of the fracture surface; (b) SEM image of the fracture surface

与此同时,镍层氧化问题严重限制烧结银-金接头的高温服役性能,在 350 °C 的高温老化试验中,Zhang 等人<sup>[27]</sup>观察到银-金接头由镍氧化导致的失效模式,如图 8 所示。外界气氛中的氧和有机溶剂分解形成的氧在高温作用下,沿多孔烧结银晶

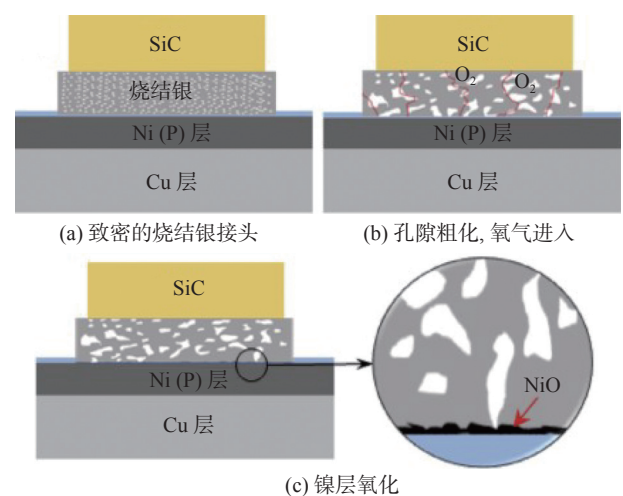
图 8 高温老化下由镍氧化导致的接头失效模式<sup>[27]</sup>

Fig. 8 Failure mode of Ag-Au joint with Ni oxidation. (a) dense sintered silver joint; (b) pore coarsening and oxygen ingress; (c) oxidation of nickel layer

界和缺陷位置迅速扩散,造成镍层氧化,与互连层分离,最终导致剪切过程中接头的脆性断裂.有学者观察 250 °C 高温老化过程中不同阶段的接头剪切断面,发现随着老化时间增加,接头断面出现镍氧化物增多,镍氧化物抑制烧结银粗化,未粗化烧结银成为脆弱区域,降低接头可靠性<sup>[28]</sup>.

### 3 烧结银-金接头互连改进研究进展

#### 3.1 快速烧结工艺

通过比较不同温度银-金间互扩散系数,学者认为,烧结开始时扩散没有发生,温度升高后,Ag 原子向金层中扩散,随着温度逐渐升高,Ag 原子在金中的扩散速度越来越快,并且大于 Ag 原子在银中的扩散速度,空洞出现,最终高温长时间烧

结使得空洞连接形成分层.基于该认识,王晓敏<sup>[29]</sup>针对平均金晶粒尺寸小的化学镀镍/金基板提出一种改进烧结工艺,引入 30 min, 150 °C 的预干燥阶段,保证有机物充分挥发的同时,减少烧结过程中在高温段的停留时间,降低 Ag 原子的非致密扩散,扩散示意图如图 9 所示,以避免发生界面分层的问题.通过比较不同温度下银-金互扩散系数大小,Wang 等人<sup>[30]</sup>提出使用快速升温的方法避开常规烧结过程中的低温区段,以避免接头发生非致密化扩散,工艺改进后,接头强度提高至 18.5 MPa.后续大量学者以这一改进后的烧结工艺为基础,进行试验研究.Zhang 等人<sup>[31]</sup>通过“阶梯式”烧结曲线:150 °C,保温 5 min→250 °C,保温 5 min→最后 300 °C,保温 15 min 烧结,制备得到互连强度为 30 MPa 的烧结接头.

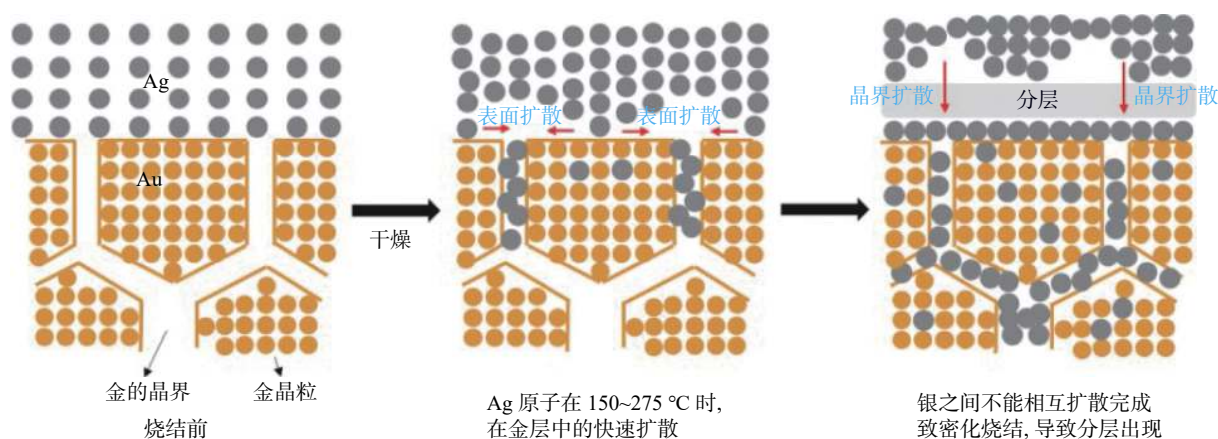


图 9 烧结银-金接头界面扩散示意图<sup>[29]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of interdiffusion between sintered Ag layer and Au metallization

#### 3.2 增大金晶粒尺寸抑制扩散

基于前人对银-金扩散主要是以晶界为扩散通道这一认知,平均晶粒尺寸小的金层可以提供更多的晶界,促进银原子向金层扩散<sup>[31]</sup>,金晶粒尺寸对接头互连影响如图 10 所示,进而形成厚银-金固溶层和薄弱烧结颈.有学者由增大表层金晶粒尺寸,抑制银-金间不平衡互扩散入手,通过热处理提高金基表面的平均晶粒尺寸;将镀金基板置于 250 °C 环境下 1 h,晶界迁移速率加快,晶粒迅速长大,表层金平均晶粒尺寸由 317 Å 长大至 516 Å,而接头抗剪强度提高 84.05%<sup>[32]</sup>.但也有研究发现,对镀镍/金结构基板进行 1 h, 250 °C 热处理后,表面金层出现镍氧化物,反而降低焊料与基板润湿性,难以形成可靠接头<sup>[33]</sup>.有学者比较金层厚度为 0.15,

0.3 和 0.8 μm 的基板与烧结银互连接头的连接性能,随镀层厚度增加,金晶粒显著增大,相应地,接头抗剪强度由 14.7 MPa 提高至 30.9 MPa<sup>[34]</sup>,但这一举措极大提高了加工成本,同样不是理想的工艺途径.

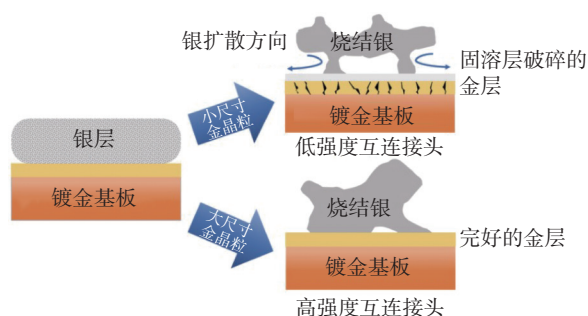


图 10 金晶粒尺寸对接头互连影响<sup>[32]</sup>

Fig. 10 Effect of Au grain on Ag-Au interconnection

### 3.3 使用镍/钯/金的金基界面结构

相较于最常见的镍/金结构,镍/钯/金结构的金基界面具有更高的化学稳定性和抗氧化性,此外引入镀钯层还可以减少 70% 的金消耗量,降低实际生产成本.近年来,已有部分学者将镍/钯/金结构应用在烧结型互连中<sup>[35]</sup>,其主要优势:一方面,钯层提高金基表面质量,提高接头高温环境下抗氧化能力<sup>[36-37]</sup>.有试验将镍/银基板、镍/金基板和镍/钯/金基板置于 350 °C 老化 1 h,镍/钯/金基板表面氧含量与镍/银基板的接近,远小于镍/金基板<sup>[38]</sup>;另一方面,依附于镍层镀覆的金晶粒远小于依附于钯层制备金基界面,而大晶粒尺寸有利于抑制银-金不平衡互扩散.有学者比较在镍/金结构和镍/钯/金结构金基表面的烧结银接头的互连性能,镍/金表面金晶粒尺寸为 0.09  $\mu\text{m}$ ,而镍/钯/金表面金晶粒尺寸为 0.12  $\mu\text{m}$ ,

相同烧结工艺下,前者接头的抗剪强度低于后者<sup>[39]</sup>.

前文银-金接头的高温服役可靠性,主要是以镍/金结构的金基界面为研究对象,而有学者对镍/钯/金结构烧结银接头进行 250 °C 的高温老化试验,银-金固溶层随时间增加而增厚,但 1 000 h 后接头仍未出现明显分层和镍氧化现象,其强度仍保持在 36.5 MPa<sup>[40]</sup>.大阪大学对烧结银与镍/钯/金界面互连接头进行-55 ~ 250 °C 的极端条件温度循环试验,由于材料内部热膨胀系数差异大,热应力作为 Ag 原子迁移的主要驱动力,导致不同区域的银-金固溶带影响形貌差异大,温度循环下接头界面形貌变化如图 11 所示.接头失效主要是因为芯片-互连层-基板 3 种材料的热膨胀系数不匹配,导致接头开裂,与银-金界面反应无关<sup>[41]</sup>,镍/钯/金界面与烧结银互连表现出优越服役可靠性.

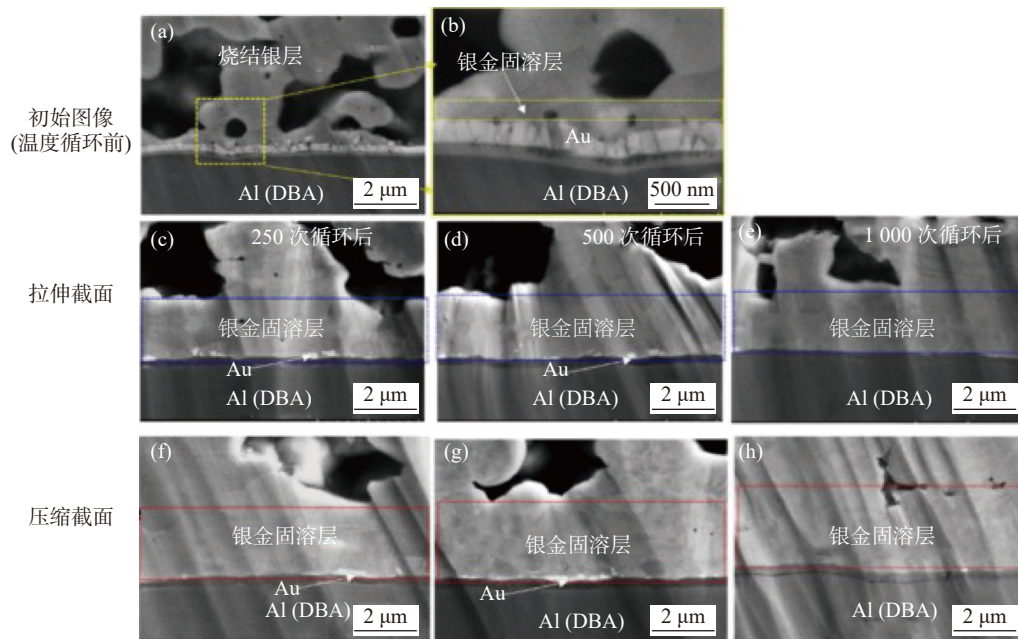


图 11 温度循环下接头界面形貌变化<sup>[40]</sup>

Fig. 11 Microstructure evolution of Ag-Au interconnection during thermal cycle aging

## 4 结束语

(1) 对比分析了烧结银与裸铜界面、银基界面和金基界面的互连机制和互连性能,并指出银-金互连的问题主要在于银-金不平衡互扩散和扩散阻挡层—镍氧化两方面.目前,对后者的机制认知还不完整,需进一步明晰镍氧化影响银-金互连的本质.

(2) 系统全面地概括了现有改善烧结银-金互

连质量的 3 种方法:快速烧结工艺和通过预热增大金晶粒尺寸的方法,虽然能有效提高接头互连质量,但仍然各有弊端;以镍/钯/金结构替换常见的镍/金结构的方法可以显著提高银-金互连质量和可靠性,因此被认为是具有潜力的新方案.

## 参考文献

- [1] Pengelly R, Wood S, Milligan J, *et al.* A review of GaN on SiC high-mobility power transistors and MMICs[J]. IEEE Transac-

- tions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(6): 1764 – 1783.
- [2] Yu F, Cui J, Zhou Z, *et al.* Reliability of Ag sintering for power semiconductor die attach in high-temperature applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7083 – 7095.
- [3] 杨婉春, 胡少伟, 祝温泊, 等. 低温烧结纳米银膏研究进展 [J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 137 – 146.
- Yang Wanchun, Hu Shaowei, Zhu Wenbo, *et al.* Research progress of low-temperature sintered nano-silver paste[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 137 – 146.
- [4] Lin L, Zhang Y, Li X. Study on the performance of silver paste sintered sealing joints for hermetic packaging[J]. China Welding, 2022, 31(1): 29 – 36.
- [5] 孟昭, 杨庆浩, 耿若愚. 现代表面镀覆科学与技术基础 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2022.
- Meng Zhao, Yang Qinghao, Geng Ruoyu. Fundamentals of modern surface plating science and technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022.
- [6] 罗树斌. 烧结纳米银焊点高温老化后的组织和性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Luo Shubin. Study on the microstructure and properties of sintering nanosilver solder joints after high temperature aging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [7] Joo S, Baldwin D F. Adhesion mechanisms of nanoparticle silver to substrate materials: identification[J]. Nanotechnology, 2009, 21(5): 055204.
- [8] 王美玉. 无压低温烧结银-镍界面互连方法及性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- Wang Meiyu. Processing and characterization of pressureless low-temperature sintered-silver bonding on nickel metallization [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [9] Ide E, Angata S, Hirose A, *et al.* Metal-metal bonding process using Ag metallo-organic nanoparticles[J]. Acta Materialia, 2005, 53(8): 2385 – 2393.
- [10] 李洁. 微-纳颗粒混合银焊膏的裸铜基板连接工艺及性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- Li Jie. A study of connection process and properties of die bonding on bare copper substrate by using a silver paste hybrid with micro and nano particles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [11] Du C, Li X, Mei Y, *et al.* An explanation of sintered silver bonding formation on bare copper substrate in air[J]. Applied Surface Science, 2019, 490: 403 – 410.
- [12] Zhang H, Li W, Gao Y, *et al.* Enhancing low-temperature and pressureless sintering of micron silver paste based on an ether-type solvent[J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(8): 5201 – 5208.
- [13] Kim D, Chen C, Pei C, *et al.* Thermal shock reliability of a GaN die-attach module on DBA substrate with Ti/Ag metallization by using micron/submicron Ag sinter paste[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58: 1 – 10.
- [14] 吴炜祯, 杨帆, 胡博, 等. 宽禁带半导体用烧结银膏与金属化基板连接机制研究 [J]. 机车电传动, 2022, 6: 149 – 155.
- Wu Weizhen, Yang Fan, Hu Bo, *et al.* A study on connection mechanism between sintering silver paste for wide bandgap semiconductor and metalized substrate[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022, 6: 149 – 155.
- [15] Yan J, Zhang D, Zou G, *et al.* Sintering bonding process with Ag nanoparticle paste and joint properties in high temperature environment[J]. Journal of Nanomaterials, 2016(2016): 1 – 8.
- [16] Chua S, Siow K. Microstructural studies and bonding strength of pressureless sintered nano-silver joints on silver, direct bond copper (DBC) and copper substrates aged at 300 °C[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 687: 486 – 498.
- [17] Zhao S, Dai Y, Qin F, *et al.* Effect of surface finish metallization layer on shearing fracture toughness of sintered silver bonded joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 264(2): 108355.
- [18] Akada Y, Tatsumi H, Yamaguchi T, *et al.* Interfacial bonding mechanism using silver metallo-organic nanoparticles to bulk metals and observation of sintering behavior[J]. Materials Transactions, 2008, 49(7): 1537 – 1545.
- [19] Paknejad S, Dumas G, West G, *et al.* Microstructure evolution during 300 °C storage of sintered Ag nanoparticles on Ag and Au substrates[J]. Journal of Alloys and Compound, 2014, 617: 994 – 1001.
- [20] Xu Q, Mei Y, Li X, *et al.* Correlation between interfacial microstructure and bonding strength of sintered nanosilver on ENIG and electroplated Ni/Au direct-bond-copper (DBC) substrates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 675: 317 – 324.
- [21] Lin L, Li X, Zhang H. An explanation for the effect of Au surface finish on the quality of sintered Ag-Au joints[J]. Applied Surface Science, 2023, 615: 156356.
- [22] Chen C, Suganuma K, Iwashige T, *et al.* High-temperature reliability of sintered microporous Ag on electroplated Ag, Au, and sputtered Ag metallization substrates[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2018, 29(10): 1785 – 1797.
- [23] Chen C, Zhang Z, Suganuma K. Evaluation of high temperature reliability of SiC die attached structure with sinter micron-size Ag particles paste on Ni-P/Pd/Au plated substrates[C]//8th Electronics System-Integration Technology Conference, Norway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020: 1-5.
- [24] Bae K, Seong J, Jong Y, *et al.* Origin of surface defects in PCB final finishes by the electroless nickel immersion gold process[J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37(4): 527 – 534.
- [25] 谭谦. 无氰化学镀金工艺的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- Tan Qian. The research of non-cyanide electroless gold plating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

- [26] Kim M, Nishikawa H. Influence of ENIG defects on shear strength of pressureless Ag nanoparticle sintered joint under isothermal aging[J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 76(9): 420 – 425.
- [27] Zhang H, Wang W, Bai H, *et al.* Microstructural and mechanical evolution of silver sintering die attach for SiC power devices during high temperature applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 774: 487 – 494.
- [28] Blank T, Bruns M, C Kübel, *et al.* Low temperature silver sinter processes on ENIG-surfaces[C]// 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nuremberg: Verband der Elektrotechnik, 2016: 1-6.
- [29] 王晓敏. 低温烧结纳米银焊膏与镀金基板互连机理与工艺研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- Wang Xiaomin. A study of die bonding on gold-plated substrate using nanosilver paste[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [30] Wang M, Mei Y, Hu W, *et al.* Pressureless sintered-silver as die attachment for bonding Si and SiC chips on silver, gold, copper, and nickel metallization for power electronics packaging: the practice and science[J]. *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(2): 2645 – 2655.
- [31] Zhang H, Zhao Z, Zou G, *et al.* Failure analysis and reliability evaluation of silver-sintered die attachment[J]. *Microelectronics Reliability*, 2019, 94: 46 – 55.
- [32] Zhang Z, Chen C, Liu G, *et al.* Enhancement of bonding strength in Ag sinter joining on Au surface finished substrate by increasing Au grain-size[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 485: 468 – 475.
- [33] Kim M, Nishikawa H. Transmission electron microscopy investigation on the oxidation behavior of electroless Ni/immersion Au surface finish at 250 °C[J]. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*, 2017, 17(11): 8522 – 8527.
- [34] Fan T, Shang P, Li C, *et al.* Effect of electroplated Au layer on bonding performance of Ag pastes[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 731: 1280 – 1287.
- [35] Wai L, Wei S, Yuan H, *et al.* High temperature die attach material on ENEPIG surface for high temperature (250 °C/500 hour) and temperature cycle (–65 to + 150 °C) applications[C]//16th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014: 229-234.
- [36] 张嵘君, 李含. ENEPIG 在倒装芯片用陶瓷外壳中的应用可行性 [J]. *先进封装技术*, 2020, 45(6): 484 – 488.
- Zhang Xiaojun, Li Han. Application feasibility of ENEPIG in ceramic package for flip chip[J]. *Advanced Packaging Technology*, 2020, 45(6): 484 – 488.
- [37] 谢梦, 张庶, 向勇, 等. 化学镀镍浸金和化学镀镍镀钯浸金表面处理工艺概述及发展趋势 [J]. *印制电路信息*, 2013(S1): 185 – 188.
- Xie Meng, Zhang Shu, Xiang Yong, *et al.* Current status and development prospect of ENIG and ENEPIG[J]. *Printed Circuit Information*, 2013(S1): 185 – 188.
- [38] Thomas B, Scherer T. , Bruns M, *et al.* Low-temperature silver sintering processes on high performance ENIG, EPiG, ENEPIG and ISiG[C]//6th Electronic System-Integration Technology Conference, Grenoble: France, 2016: 1-6.
- [39] Chen C, Zhang Z, Wang Q, *et al.* Robust bonding and thermal stable Ag–Au joint on ENEPIG substrate by micron-scale sinter Ag joining in low temperature pressure-less[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 828: 154397.
- [40] Chen C, Zhang Z, Kim D, *et al.* Interface reaction and evolution of micron-sized Ag particles paste joining on electroless Ni-/Pd-/Au-finished DBA and DBC substrates during extreme thermal shock test[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 862: 158596.
- [41] Liu Y, Chen C, Kim D, *et al.* Modified Ni/Pd/Au-finished DBA substrate for deformation-resistant Ag-Au joint during long-term thermal shock test[J]. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2021, 32(15): 20384 – 20393.

第一作者: 汪智威, 硕士研究生; 主要研究方向为功率电子封装材料; Email: tjuwangzhiwei@163.com.

通信作者: 李欣, 博士, 副教授; Email: xinli@tju.edu.cn.

(编辑: 郑红)