



碳纳米管-石墨烯增强纳米 Ag 膏 低温连接功率芯片

朱堂葵¹, 李国超², 张宏强³

(1. 义乌工商职业技术学院, 金华 322000;

2. 西南石油大学 工程学院, 南充 637001;

3. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100084)

摘要: 纳米 Ag 烧结因具有优异的导热和耐高温性, 将是第三代宽禁带半导体芯片封装的理想的连接材料, 如何选择合适的第二相以稳定高温服役过程中烧结层组织的演变, 是当前 Ag 烧结技术面临的重要挑战之一。本文采用碳纳米管-石墨烯(CNT-G)来增强纳米 Ag 焊膏, 通过分析烧结组织和接头剪切性能, 研究添加相后对烧结接头的影响规律。结果表明: CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏的分解温度为 250 °C, 焊膏中碳纳米管、石墨烯和 Ag 的含量为 93% (质量分数)。随着烧结温度升高, 大量颗粒之间形成烧结颈, 使得烧结层的致密度逐渐提高, 电阻率逐渐降低。CNT-G 增强的纳米 Ag 焊膏可以在温度 ≥ 230 °C、烧结压力 5 MPa 下实现 SiC 芯片和基板连接, 其烧结层与芯片和基板都形成了良好冶金结合。

关键词: 纳米 Ag 焊膏; 烧结连接; SiC 芯片; 微观组织

文章编号: 1004-0609(2021)-12-3574-09

中图分类号: TG425.1

文献标志码: A

引文格式: 朱堂葵, 李国超, 张宏强. 碳纳米管-石墨烯增强纳米 Ag 膏低温连接功率芯片[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3574–3582. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36684

ZHU Tang-kui, LI Guo-chao, ZHANG Hong-qiang. Low temperature sintering of power chip by carbon nanotube-graphene reinforced nano-Ag paste[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3574–3582. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36684

电力电子在轨道交通牵引动力、超高压输变电、风能发电及输变电、智能电网、新能源汽车、油气深井探测等工业交流及新能源领域得到日益广泛应用^[1–3]。以碳化硅(SiC)等为代表的第三代宽禁带半导体材料, 凭借其高击穿电场、高热导率、高饱和电子速率和强抗辐射能力等优势, 打破硅基材料本身性能的瓶颈, 陆续在高温、高压、高频和抗辐射的高功率器件上得到应用, 为未来众多产业发展提供了全新的可能性^[4–5]。功率模块是电力电子的核心部件, 正朝着高功率、高封装密度和高可靠性的方向发展, 随之带来的是器件服役温度越来越高, 一方面是源于工作环境温度的提升, 另一方

面是器件自身的功耗致热。虽然 SiC 芯片能够承受高温、高频、高压等极端条件, 但严苛的环境对器件的封装, 尤其是对芯片连接的耐高温性、可靠性提出了严苛的要求^[6–7]。

功率模块内部连接包括芯片表面连接、芯片封装和功率端子引出连接^[8]。芯片封装是关键的连接部位之一, 通常采用焊接的方式进行。高 Pb 焊料广泛地应用于分立器件以及高功率的集成模块贴片连接, 但 Pb 会对健康产生危害, 对环境产生污染, 因此, 必须要有合适无铅焊料替代。基于目前公开的文献报道, 常用的耐高温无 Pb 连接技术有高熔点焊料钎焊、瞬态液相扩散连接和纳米金属

基金项目: 义乌工商职业技术学院重点科研项目(ZD2021CS414-01)

收稿日期: 2021-02-25; **修订日期:** 2021-08-15

通信作者: 张宏强, 助理教授, 博士; 电话: 010-82338500; E-mail: zhanghq@buaa.edu.cn

烧结等^[9-12]。

纳米颗粒的表面能和活性高, 其熔点随着颗粒的尺寸减小而降低, 形成极易扩散的纳米尺寸效应。利用此特点, 通过适当的温度和压力, 金属纳米颗粒可与两侧基板通过原子相互扩散实现连接^[13-14]。Ag、Cu 纳米颗粒具有良好的电、热等特性, 在较低温度下烧结其焊膏可以实现芯片的封装^[15-16]。研究表明纳米 Ag 焊膏可以实现低温封装, 同时具有优异的耐高温性和导热性^[17]。然而, 纯 Ag 烧结层在高温服役过程中极易发生孔隙的长大及聚集, 导致组织的不稳定性, 对功率器件的应用有很大的影响^[18-20]。如何稳定烧结层组织, 是当前烧结 Ag 技术面临的重要挑战之一。有文献报道 Ag 纳米焊膏中添加合适的第二相是提高其组织稳定性的有效途径之一。例如, 日本大阪大学 ZHANG 等^[21]向纳米 Ag 焊膏中添加了 0.1~5%(质量分数)的 SiC 颗粒, 成功获得了比单一 Ag 更稳定的烧结组织。但是 SiC 颗粒的导电能力相比于 Ag 的要差, 添加后影响了烧结连接层的导电性, 增加了器件的发热量。将涂有 Ag 的 SiC 颗粒引入纳米膏中, 以提高 SiC 与 Ag 颗粒之间的结合强度, 并增强纳米 Ag 焊膏的高温稳定性。结果显示, 随着烧结温度和时间的增加, 剪切强度明显提高。经过热老化测试和湿度和温度测试 240 h 后, 剪切强度略有下降, 且 SiC 颗粒的添加比例与剪切强度之间呈负相关。

选择合适的第二相添加到纳米 Ag 焊膏中, 在尽量减少对其力学性能、导电、导热性能的影响前提下, 稳定 Ag 烧结组织进而提高器件服役的稳定性具有非常重要的意义。本文采用导电性、导热性

优异的碳纳米管-石墨烯来增强稳定纳米 Ag 膏, 研究增强型焊膏的导电性, 通过烧结组织和接头剪切性能的研究, 分析碳纳米管-石墨烯增强纳米 Ag 焊膏的烧结接头的影响规律。

1 实验

采用电火花制备 Ag 纳米颗粒, 选择纯度为 99.99% 的 Ag 作为电极。0.1 mol/L 浓度的聚乙烯吡咯烷酮水溶液作为工作液, 收集和保护纳米颗粒防止发生团聚。制备后的纳米颗粒溶液进行离心、烘干成纳米 Ag 颗粒。碳纳米管和石墨烯混合液(体积比 1:1, 简称 CNT-G 混合液)由滁州博创能源公司提供, 该混合液的浓度为 20 mg/mL, 其形貌如图 1 所示。将 5 g 纳米 Ag 颗粒加入 3 mL 的 CNT-G 混合液中, 采用搅拌器搅拌 5 h, 同时再加入聚乙二醇($\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$), 获得可印刷且黏度适中的 CNT-G 增强的纳米 Ag 焊膏, 如图 2 所示。

采用扫描电子显微镜(Merlin Compact)和透射电子显微镜(F30 HRTEM)对纳米 Ag 颗粒、石墨烯-碳纳米管的形貌和成分进行表征; 采用同步热分析仪(STA449F3)对纳米 Ag 焊膏中组分及焊膏在加热过程中的分解与质量损失行为进行分析, 获得 CNT-G 增强 Ag 纳米焊膏中 Ag 的具体含量。

低温烧结连接氧化铝陶瓷覆铜基板(DBC)和 SiC 芯片。SiC 二极管芯片(650 V、8 A)由 CREE 公司提供, 连接表面溅射有 1.2 μm 的 Ag 层。DBC 基板表面为镀镍浸金(ENIG)层。纳米 Ag 焊膏涂覆在 DBC 上, 在 90 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 5 min, 然后在 230~

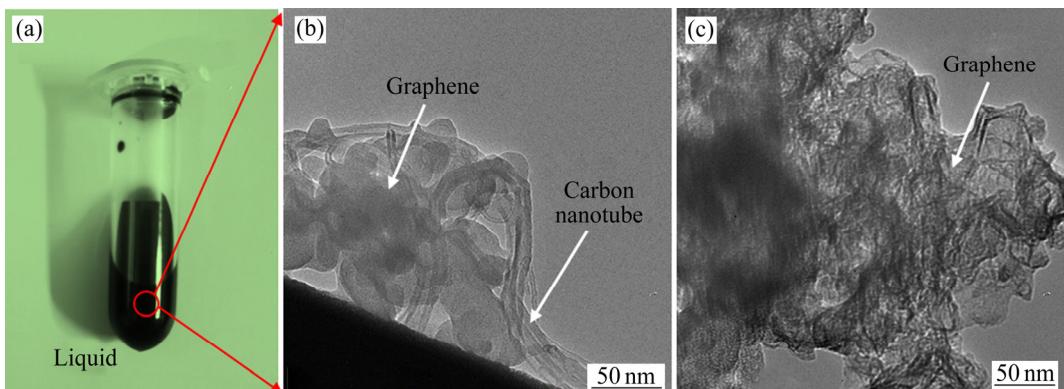


图 1 CNT-G 混合液和碳纳米管-石墨烯 TEM 像

Fig. 1 CNT-G mixed liquid(a) and TEM images of graphene and carbon nanotubes((b)–(c))

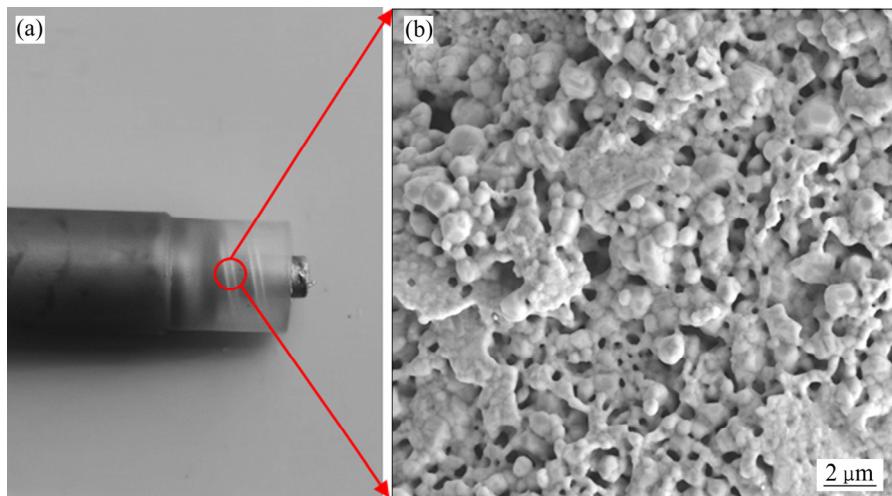


图2 CNT-G 增强的纳米 Ag 焊膏和 200 °C 烧结 10 min 后的焊膏 SEM 像

Fig. 2 CNT-G enhanced nano-Ag paste(a) and SEM image of paste after sintering at 200 °C for 10 min(b)

300 °C 和压力 5 MPa 的条件下保温 15 min 进行烧结连接。采用 Dage4000 对烧结接头的抗剪强度进行测试, 剪切速度为 5 mm/min, 气氛为空气。横截面组织和接头断口采用 SEM 观测。

2 结果与分析

2.1 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏热分析

图 3 所示为 CNT-G 混合液和 CNT-G 增强的纳米 Ag 焊膏的 TG-DSC 曲线。根据热分解曲线可知, CNT-G 混合液的分解温度为 171 °C, 溶液中碳纳米管和石墨烯的占比为 12.5% (质量分数)。从 CNT-G 增强的纳米 Ag 焊膏的 TG-DSC 曲线可知, 焊膏中碳纳米管、石墨烯和 Ag 的含量为 93% (质量分数)。根据热重的变化, 焊膏加热过程中可以分为以下三个阶段。第一阶段(<150 °C), 焊膏的质量降低了 6.3%。该阶段温度较低, 说明焊膏的中低熔点的乙醇、丙酮等有机物大量挥发^[22]。该阶段为后续的烧结曲线定制提供了依据, 在 150 °C 下保温, 可以有效降低焊膏黏度, 初步固化, 防止焊膏大量挤出。第二阶段(150~250 °C), 焊膏的质量接着降低了 1%。该阶段的温度处于中间位置, 焊膏中的熔点比较高的有机物分解, 如松油醇等^[23]。有机物的大量挥发, 使得被有机物包裹的颗粒裸露出来, 初步形成了烧结颈。第三阶段(>250 °C), 焊膏的质量降低 0.7%。测试温度升至 500 °C, 焊膏

的质量再无变化, 说明有机物的挥发完毕, 颗粒在压力的作用下, 开始彼此之间的扩散。

2.2 烧结接头微观组织

图 4(a)所示为采用 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结连接 SiC 芯片和 DBC 基板的宏观烧结接头。图 4(b)所示为烧结接头横截面微观组织。横截面表面经过等离子抛光后电镜下观测, 发现烧结层是由多孔结构组成, 且孔洞的分布并不均匀, 靠近芯片侧孔洞率高, 而靠近基板侧烧结层相对比较致密。图 4(c)所示为靠近芯片侧烧结层的组织放大图。孔隙呈不规则的形状, 孔径约为 1~2 μm, 该区域的平均孔隙率为 26%。CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结连接 SiC 芯片和 DBC 基板时, 当烧结温度达到能够分解焊膏中有机物后, 便能释放出裸露的颗粒。这些裸露的颗粒相互接触, 与颗粒和基板之间发生扩散形成烧结颈, 并逐渐长大, 颗粒之间的接触点处形成晶界。图 4(d)所示为靠近基板侧烧结层的组织放大图。虽然孔隙的形状也呈不规则, 但是其面积明显减小, 平均孔隙率为 9%。图 4(e)所示为烧结层与芯片之间的连接界面及其相应的微观组织。SiC 芯片自身的溅射层有 Ni 和 Ag。从连接界面的微观组织观察可知, 烧结层与 SiC 芯片背面的溅射 Ag 层形成了良好冶金结合, Ni 层与溅射 Ag 层和烧结层间界面清晰。图 4(f)所示为烧结层与基板的连接界面及其微观组织。CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏在 DBC

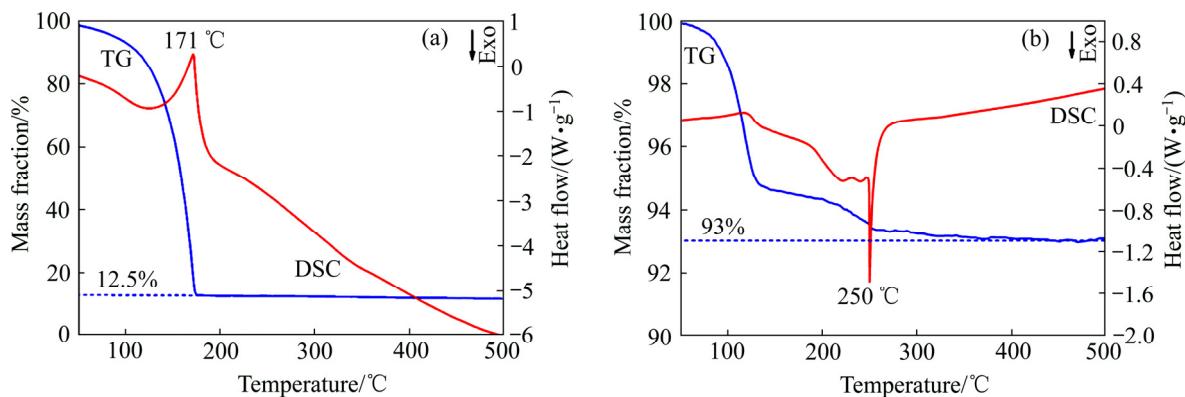


图3 CNT-G 混合液和 CNT-G 增强的纳米 Ag 焊膏的 TG-DSC 热重变化(加热速率 5 °C/min, 空气气氛)

Fig. 3 TG-DSC curves of CNT-G mixed liquid(a) and CNT-G enhanced nano-Ag paste(b) (heating rate 5 °C/min, air atmosphere)

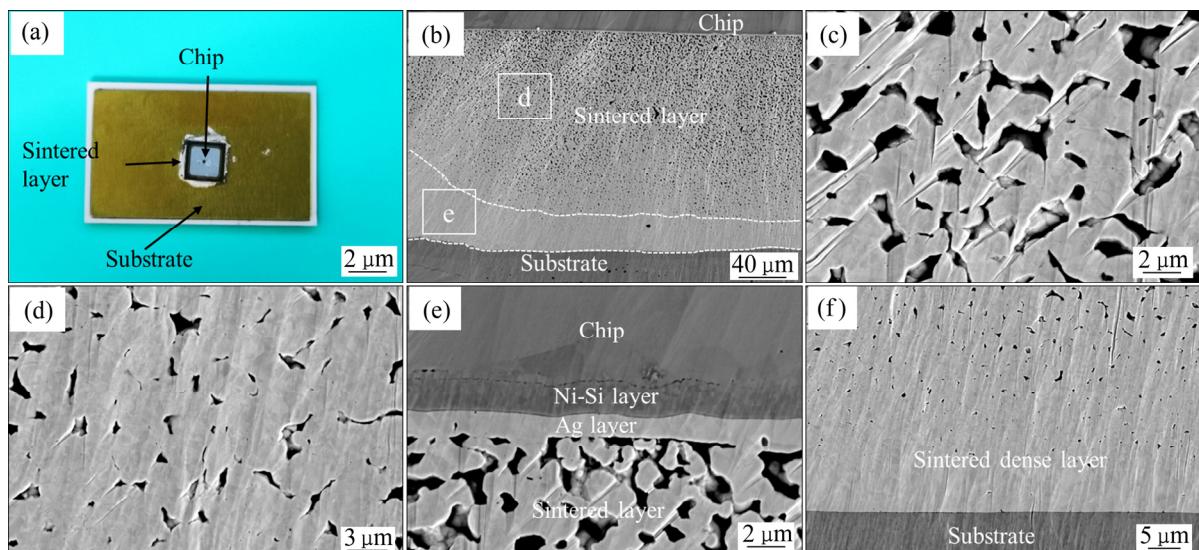


图4 采用 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结 SiC-DBC 连接接头(烧结温度 250 °C, 烧结时间 15 min)

Fig. 4 Sintered SiC-DBC joint by CNT-G reinforced Ag paste: (a) Macro image; (b) Cross-section microstructure; (c) Magnified view of sintered layer on chip side; (d) Magnified view of sintered layer on substrate side; (e) Bonding interface between sintered layer and chip; (f) Bonding interface between sintered layer and substrate

的 Au 层表面完全铺展，并在烧结后形成了厚度约 20~30 μm 的致密层，致密层与基板金属形成了良好的结合。

在烧结前，在 Au 层表面印刷纳米 Ag 焊膏。在烧结中，温度的提升促使颗粒和 Au 层的接触面上发生 Ag 和 Au 原子的扩散。实际的烧结过程中通常存在多种扩散机制，且在不同的烧结阶段不同机制的效果和影响也不尽相同。在温度较低或粉末粒径较小的情况下，表面扩散和晶界扩散可能是主要的。而在烧结后期，晶界扩散与体积扩散逐渐占

据主导地位^[24]。利用纳米 Ag 烧结互连，整个连接时间较短，始终处于烧结初期，由于纳米颗粒尺寸小，比表面积大，比表面能高，体积扩散通道窄，因此表面扩散在这一过程中起主导作用。表面迁移促使烧结颈部的长大，体积扩散提升了烧结层的密度。加之 Ag 颗粒在 Au 层表面铺展，逐渐形成烧结致密层^[25]。另外，因烧结致密层的形成，且 Ag 颗粒向 Au 层扩散铺展速率很快，消耗了较多的 Ag 颗粒，而邻近区域没有足够的 Ag 颗粒及时补充，因此，紧靠致密层附近的连接层内孔洞分布较为密

集, 致使该区域的孔隙率明显大于其他区域, 最终形成了接头 DBC 侧和 SiC 侧孔洞不均匀分布的现象^[26]。

Ag 颗粒通过烧结与 SiC 芯片和 DBC 基板两侧形成良好的连接, 烧结后颗粒之间形成多孔结构的连接 Ag 层, 孔洞呈不规则的岛状, 断断续续地分布在整个烧结层内。因为 CNT-G 尺寸很小, SEM 像中难以直接观测到, 为此, 对烧结层进行成分面扫描分析。C 元素在抛光表面并不是均匀分布的, 这些 C 聚集的区域即是碳纳米管-石墨烯, 如图 5 所示。

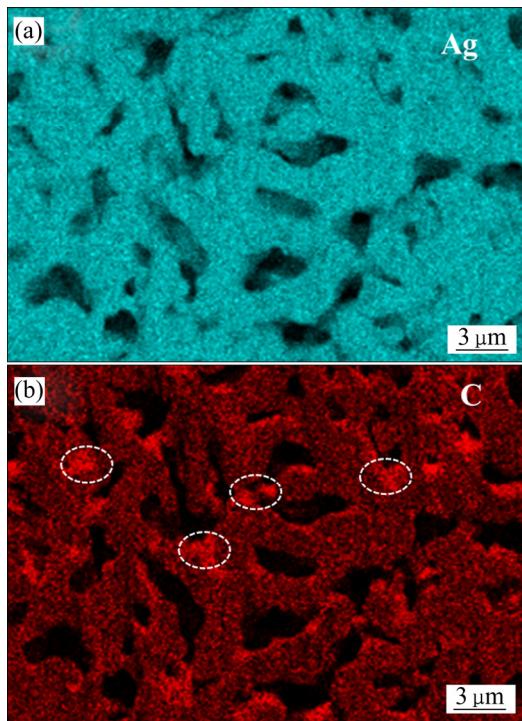


图 5 烧结层 Ag 元素和 C 元素面扫描分布

Fig. 5 Elemental mapping scanning of sintered layer: (a) Ag element; (b) C element

2.3 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏的导电性

采用四探针法测量在不同温度下烧结 10 min 后的 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏的电阻率, 其结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 随着烧结温度升高, 焊膏中添加的稀释剂、黏结剂等有机物逐步被分解, 越来越多的颗粒之间形成烧结颈使得烧结体逐渐致密, 其电阻率逐渐降低。当烧结温度为 250 °C 和 300 °C 时, 焊膏的电阻率分别为 $34.1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 和 $4.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 此电阻值可以满足功率器件对

烧结层电导率的要求^[27]。与纯 Ag 纳米焊膏相比较, 因为石墨烯-碳纳米管优异的导电性, 混合焊膏烧结层的电阻率降低。

2.4 烧结接头强度及剪切断口分析

芯片和基板接头的良好的连接强度, 不仅是电气连接和热量传输的前提条件, 也是整个功率电子可靠性的基本保障。接头剪切试验是检验连接强度和烧结质量快捷有效的途径。图 7 所示为在固定烧结时间和烧结压力的条件下烧结温度对芯片和基板连接接头剪切强度的影响规律。

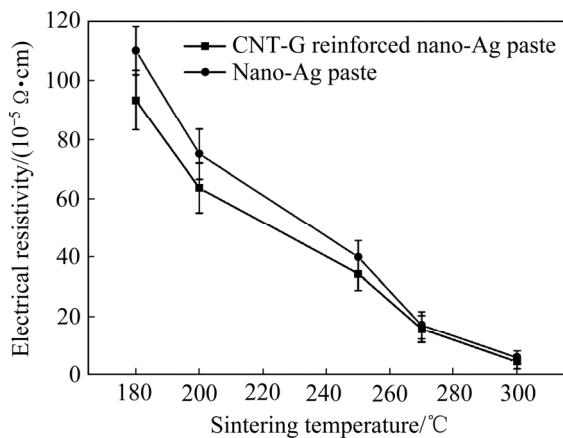


图 6 不同温度下烧结 10 min 后 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏的电阻率

Fig. 6 Resistivity of CNT-G reinforced nano-Ag paste after sintering for 10 min at different temperatures

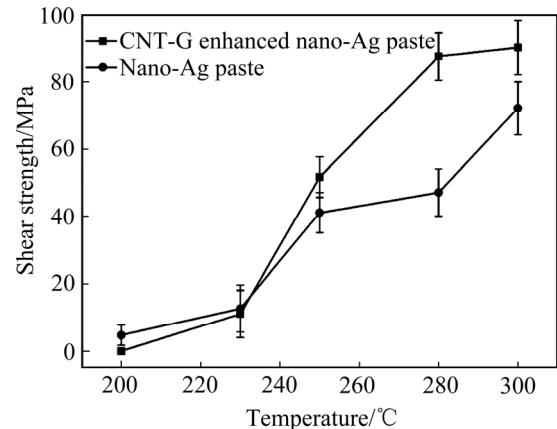


图 7 烧结温度对接头剪切强度的影响规律

Fig. 7 Effect of sintering temperature on shear strength

当烧结温度为 200 °C 时, 因焊膏中有机物分解有限, 互连的颗粒有限, 接头连接强度较低, 纳米 Ag 焊膏烧结的接头没有实现有效连接, 而

CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结接头的强度也仅为 5 MPa。随着温度的提升, 接头的强度近似线性提升, 同时强度值分布较为集中。当烧结温度为 230 °C 时, CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏和纳米 Ag 焊膏烧结的接头的平均强度分别为 12 MPa 和 11 MPa, 此值已满足美国军标 MIL-STD-883J 所要求的强度值(6 MPa)。根据 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏的 TG-DSC 曲线, 在 150~250 °C 温度范围内, 焊膏中的有机物快速减少, 有机物组分大量分解, 被有机物包裹的颗粒逐渐被释放出来, 提高了颗粒间的接触面积以及颗粒与基板间的接触面积。纳米 Ag 烧结就是扩散过程, 随着烧结温度的提高, Ag 颗粒的扩散能力相应增大, Ag 颗粒与芯片和基板接触的金属镀层发生互扩散并形成冶金结合界面。当温度为 280 °C 时, CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏和纳米 Ag 焊膏烧结的接头的强度分别为 87 MPa 和 47 MPa。进一步提高烧结温度到 300 °C 时, CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结接头的剪切强度提升速率降低, 其平均剪切强度为 90 MPa。纳米 Ag 焊膏烧结的接头强度也达到 72 MPa。因此, CNT-G 增强纳米 Ag 的混合焊膏在 230~300 °C 范围都能实现芯片和基板的

连接, 该焊膏具有较大的烧结工艺窗口。与纯 Ag 纳米焊膏相比较, 因为石墨烯-碳纳米管的作为第二相的加入, 采用 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结的接头剪切强度有了较显著的提升。

图 8 所示为在 250 °C 烧结后的接头剪切断口形貌。从图 8(a)可知, 接头剪切断裂后, 烧结层绝大多数留在了基板侧, 少部分留在了芯片侧, 断口表面较为平整。图 8(b)所示为接头的微观断口 SEM 像。在断面并未有残留的芯片, 也并未有完全裸露的基板, 表明断裂位置都是从烧结层处开裂。图 8(c)所示为靠近芯片侧断裂的高倍照片。由图 8(c)可知, 该区域的烧结孔隙率较大, 彼此之间较为独立, 在于芯片接触的部位, 有明显的撕裂现象。图 8(d)所示为靠近基板侧断裂的高倍照片。由图 8(d)可知, 该区域的烧结致密度很高, 在断裂时出现塑性变形带, 具有与剪切方向一致的撕裂痕迹, 局部还能观测到韧窝。基板侧的连接质量显著高于芯片侧, 这与横截面组织观测结果一致。基板和芯片两侧的断口不同的主要原因是两者的金属镀层不一致, 基板表面的 Au 层与 CNT-G 增强的纳米 Ag 焊膏互扩散, 形成冶金结合良好的致密层。

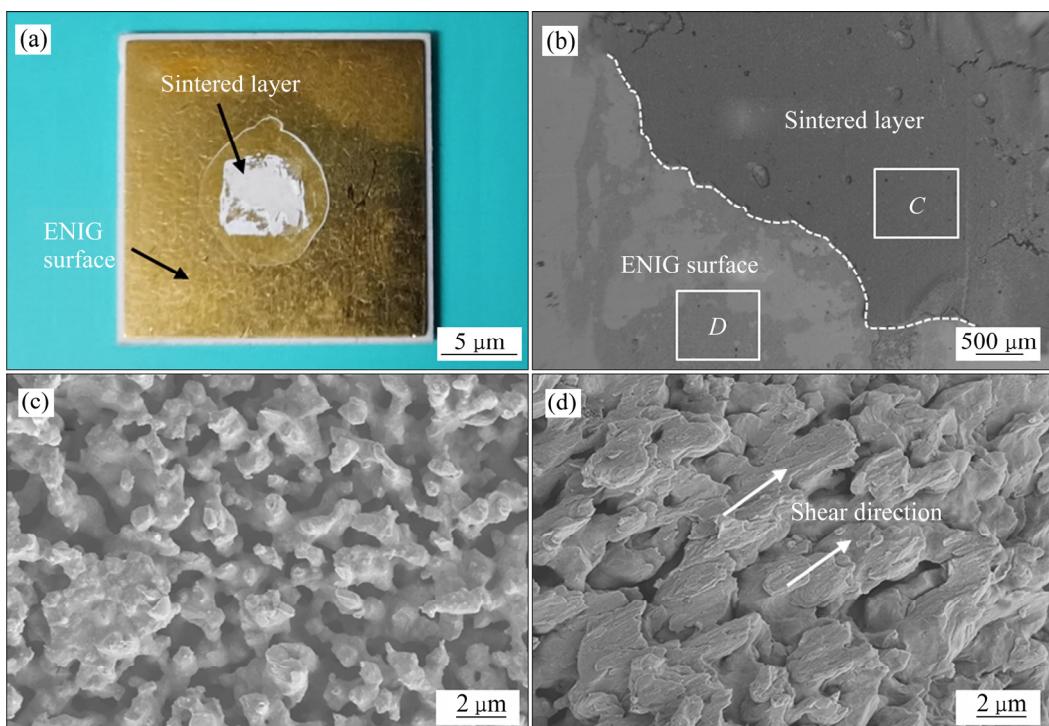


图 8 在 250 °C 烧结的接头剪切断口形貌

Fig. 8 Shear fracture morphologies of joint sintered at 250 °C: (a) Macroscopic fracture morphology; (b) Microscopic fracture morphology; (c) Enlarged view of region C; (d) Enlarged view of region D

3 结论

1) CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏的分解温温度为 250 °C, 焊膏中碳纳米管、石墨烯和 Ag 的含量为 93% (质量分数)。随着烧结温度升高, 焊膏中添加的稀释剂、黏结剂等有机物逐步被分解, 越来越多的颗粒之间形成烧结颈致使烧结体的致密度逐渐提高, 电阻率逐渐降低。与纯 Ag 纳米焊膏相比较, 因为 CNT-G 优异的导电性, CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结层的电阻率显著降低。

2) CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏可以在温度 230~300 °C、烧结压力 5 MPa 时实现 SiC 芯片和 DBC 基板的连接, Ag 烧结层与芯片和基板都形成了良好冶金结合。Ag 烧结层为多孔结构, 断断续续地分布在烧结层内, 孔洞呈不规则的岛状, 分布并不均匀, 靠近芯片侧孔洞率高, 而靠近基板侧烧结层相对比较致密。

3) CNT-G 增强纳米 Ag 的混合焊膏在 230~300 °C 范围都能实现芯片和基板的连接, 且其剪切强度满足美军标要求, 该焊膏具有较大的烧结工艺窗口。由于 CNT-G 的作为第二相的加入, 采用 CNT-G 增强纳米 Ag 焊膏烧结的接头剪切强度有了较显著提升。烧结接头在剪切测试中, 断裂位置都是从烧结层处开裂。

REFERENCES

- [1] 宁圃奇, 李磊, 曹瀚, 等. 基于 Si IGBT/SiC MOSFET 的混合开关器件综述[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(10): 1~9.
NING Pu-qi, LI Lei, CAO Han, et al. Summary of Si IGBT/SiC MOSFET based hybrid switching device[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(10): 1~9.
- [2] 王征, 刘文, 梅云辉, 等. 宽禁带电力电子器件关键封装材料研究进展[J]. 电力电子技术, 2017(8): 88~91.
WANG Zheng, LIU Wen, MEI Yun-hui, et al. Review on key packaging materials for wide-band-gap power semiconductors[J]. Power Electronics, 2017(8): 88~91.
- [3] Vahid Attari, Supriyo Ghosh, Thien Duong, et al. On the interfacial phase growth and vacancy evolution during accelerated electromigration in Cu/Sn/Cu microjoints[J]. Acta Materialia, 2018, 160: 185~198.
- [4] MILLÁN J, GODIGNON P, PERPIÑÀ X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155~2163.
- [5] ROCCAFORTE F, FIORENZA P, GRECO G, et al. Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices[J]. Microelectronic Engineering, 2018, 187~18866~77.
- [6] ZHENG Han-guang, NGO K D T, LU Guo-quan. Thermal characterization system for transient thermal impedance measurement and power cycling of IGBT modules[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(12): 2575~2581.
- [7] 曾婧, 彭超群, 王日初, 等. 电子封装用金属基复合材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(12): 3255~3270.
ZENG Jing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, et al. Research and development of metal matrix composites for electronic packaging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(12): 3255~3270.
- [8] 曾正, 李晓玲, 陈昊, 等. SiC、Si、混合功率模块封装对比评估与失效分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4823~4835.
ZENG Zheng, LI Xiao-ling, CHEN Hao, et al. Comparative package evaluation and failure mode analysis of SiC, Si, and hybrid power modules[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4823~4835.
- [9] MEI Yun-hui, CHEN Gang, LU Guo-quan, et al. Effect of joint sizes of low-temperature sintered nano-silver on thermal residual curvature of sandwiched assembly[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012, 35: 88~93.
- [10] CHEN Chuan-tong, NAGAO S, SUGANUMA K, et al. Macroscale and microscale fracture toughness of microporous sintered Ag for applications in power electronic devices[J]. Acta Materialia, 2017, 129: 41~51.
- [11] LIU Han, XUE Song-bai, TAO Yu, et al. Design and solderability characterization of novel Au-30Ga solder for high-temperature packaging[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31(3): 2514~2522.
- [12] JUNG K H, MIN K D, LEE C J, et al. Pressureless die attach by transient liquid phase sintering of Cu nanoparticles and

- Sn-58Bi particles assisted by polyvinylpyrrolidone dispersant[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 781: 657–663.
- [13] KAMYSHNY A, MAGDASSI S. Conductive nanomaterials for printed electronics[J]. *Small*, 2015, 10(17): 3515–3535.
- [14] KIM M I, LEE J H. Die sinter bonding in air using particulate preform and rapid formation of near-full density bondline[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 1724–1738.
- [15] GAO Yue, TAKATA S, CHEN Chuan-tong, et al. Reliability analysis of sintered Cu joints for SiC power devices under thermal shock condition[J]. *Microelectronics Reliability*, 2019, 100/101: 113456.
- [16] TATUMI H, YAMAGUCHI H, MATSUDA T, et al. Deformation behavior of transient liquid-phase sintered cu-solder-resin microstructure for die-attach[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(3476): 1–15.
- [17] ZHANG Hong-qiang, WANG Wen-gan, BAI Hai-lin, 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*, 2019, 77: 4487–494.
- [18] YANG Fan, ZHU Wen-bo, WU Wei-zhen, et al. Microstructural evolution and degradation mechanism of SiC-Cu chip attachment using sintered nano-Ag paste during high-temperature ageing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 846: 156442.
- [19] MCCOPPIN J R, YOUNG D. Mass transport, creep and zero-stress-point shifting in a nano-silver die-attach material during thermal cycling[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(6): 3982–3989.
- [20] KIM D, NAGAO S, CHEN C, et al. On-line thermal resistance and reliability characteristic monitoring of power modules with Ag sinter joining and Pb, Pb-free solders during power cycling test by SiC TEG chip[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(5): 4977–4990.
- [21] ZHANG Hao, NAGAO S, SUGANUMA K. Addition of SiC particles to Ag die-attach paste to improve high-temperature stability; grain growth kinetics of sintered porous Ag[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(10): 3896–3903.
- [22] WAKUDA D, KIM K S, SUGANUMA K. Ag nanoparticle paste synthesis for room temperature bonding[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2010, 33(2): 437–442.
- [23] YANG Cheng-xiang, LI Xin, LU Guo-quan, et al. Enhanced pressureless bonding by tin doped silver paste at low sintering temperature[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 660: 71–76.
- [24] 果世驹. 粉末冶金理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 125–220.
- GUO Shi-ju. Theory of powder metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 125–220.
- [25] CHEN Chuan-tong, ZHANG Zheng, WANG Qian, 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.
- [26] LIN Yu-chung, LIU Xiao-yang, CHOU Kang-wei, et al. Unveiling 3D morphology of multiscale micro-nanosilver sintering for advanced electronics manufacturing by ptychographic X-ray nanotomography[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2020, 22(4): 1901250.
- [27] ZHANG Z, LU Guo-quan. Pressure-assisted low-temperature sintering of silver paste as an alternative die-attach solution to solder reflow[J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2002, 25(4): 279–283.

Low temperature sintering of power chip by carbon nanotube-graphene reinforced nano-Ag paste

ZHU Tang-kui¹, LI Guo-chao², ZHANG Hong-qiang³

(1. Yiwu Industrial and Commercial College, Jinhua 322000, China;

2. School of Engineering, Southwest Petroleum University, Nanchong 637001, China;

3. School of Mechanical Engineering& Automation, Beihang University, Beijing 100084, China)

Abstract: Nano-Ag sintering is an ideal sintering materials for third-generation wide-band gap semiconductor chip packaging due to its excellent thermal conductivity and high temperature resistance. How to choose a suitable second phase to stabilize the evolution of the sintered layer structure during high-temperature operation is one of the important challenges of Ag sintering technology. In this paper, carbon nanotube-graphene (CNT-G) was used to reinforce the nano-Ag paste. The sintered microstructure, shear strength, and the influence of the added phase were analyzed. Results show that the decomposition temperature of CNT-G reinforced nano-Ag paste is 250 °C, and the content of Ag and CNT-G is 93% (mass fraction). As sintering temperature increases, more and more particles form sintering necks, which gradually increases the density of the sintered body. The CNT-G reinforced nano-Ag paste can realize bonding SiC chip and DBC substrate at temperature of ≥ 230 °C and sintering pressure of 5 MPa.

Key words: nano-Ag paste; sintering; SiC chip; microstructure

Foundation item: Project(ZD2021CS414-01) supported by the Key Research Foundation of Yiwu Industrial and Commercial College, China

Received date: 2021-02-25; **Accepted date:** 2021-08-15

Corresponding author: ZHANG Hong-qiang; Tel: +86-10-82338500; E-mail: zhanghq@buaa.edu.cn

(编辑 龙怀中)