

引用格式: 余翠娟, 叶益聪, 堵永国, 等. 新型热界面材料-纳米银纸的性能研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(4): 373-379.  
YU C J, YE Y C, DU Y G, *et al.* Study of New Thermal Interface Material-Nanosilver Paper[J]. Materials China, 2025, 44(4): 373-379.

# 新型热界面材料-纳米银纸的性能研究

余翠娟, 叶益聪, 堵永国, 王 震, 彭泳潜, 徐元曦

(国防科技大学空天科学学院材料科学与工程系, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 第三代半导体材料具有禁带宽度大、击穿电场高、热导率高等优异性能, 满足大功率器件向微型化、高性能、高组装密度、高可靠性方向发展的性能要求, 但传统的界面材料已无法满足器件的高散热需求, 研究与之匹配的新型热界面材料迫在眉睫。采用湿法造纸技术将均匀分散的银纳米线溶液制备成一种兼具高纯度、高导热和高强度的纳米银纸, 研究了纳米银纸热压烧结后的导热性能和与基体的粘接强度, 分析了热压烧结后纳米银纸的微观形貌及剪切断面形貌。结果表明, 纳米银纸在 250 °C/10 MPa/10 min 的条件下热压烧结后, 组织致密, 孔隙率<5%, 热阻 $\leq 0.8 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , 与基体间的室温剪切强度高达 39 MPa, 400 °C 高温条件下剪切强度高达 13 MPa。纳米银纸作为一种新型低温烧结 ( $\leq 250 \text{ °C}$ )、宽温域服役 (常温~800 °C) 的热界面材料, 在大功率半导体器件的封装中具有广泛的应用前景。

**关键词:** 纳米银纸; 新型热界面材料; 湿法造纸; 低温烧结; 宽温域服役; 大功率半导体

**中图分类号:** TM241; TB383 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)04-0373-07

## Study of New Thermal Interface Material-Nanosilver Paper

YU Cuijuan, YE Yicong, DU Yongguo, WANG Zhen, PENG Yongqian, XU Yuanxi

(Department of Materials Science and Engineering, School of Aerospace Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The third generation semiconductor materials have excellent properties such as wide bandgap, high breakdown electric field and high thermal conductivity, which meet the performance requirements of high-power semiconductor devices towards miniaturization, high performance, high packing density and high reliability. However, the traditional thermal interface materials can no longer meet the high heat dissipation requirements of the devices, so it is urgent to study a new type of thermal interface materials that matches it. A kind of nano-silver paper with high purity, high thermal conductivity and high strength was prepared from uniformly dispersed silver nanowire solution by wet papermaking technology. The thermal conductivity and shear strength of nano-silver paper after hot-pressing sintering were studied, and the micromorphology and shear fracture morphology of the nano-silver paper after hot-pressing sintering were analyzed. The results show that the nano-silver paper has compact structure at the hot-pressing sintering process of 250 °C/10 MPa/10 min, porosity is less than 5%, thermal resistance is less than  $0.8 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , the room temperature shear strength with the substrate is 39 MPa, the shear strength at 400 °C is 13 MPa. As the low-temperature sintering ( $\leq 250 \text{ °C}$ ) and wide-temperature range service (room temperature~800 °C) new thermal interface material, nano-silver paper has a wide application prospect in the packaging of high-power semiconductor devices.

**Key words:** nano-silver paper; new thermal interface materials; wet papermaking; low-temperature sintering; wide-temperature range service; high-power semiconductor

## 1 前 言

近年来, 高温、高频、高压、高效的大功率半导体器件在 5G 通信基站、新能源汽车等民用领域和相控阵雷达等军用领域的应用前景越来越广阔<sup>[1]</sup>, 随着半导体器件向小型化、高性能、高集成度和高可靠性方向的发展, 散热是制约其发展的关键问题<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2023-04-23 修回日期: 2023-10-23

第一作者: 余翠娟, 女, 1987 年生, 工程师

通讯作者: 叶益聪, 男, 1985 年生, 教授, 博士生导师,

Email: 18505993519@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202304023

以 SiC 和 GaN 为代表的第三代半导体材料具有禁带宽度大、临界击穿电场强、热导率高等优异特性,满足半导体器件的发展要求,已成为当今电力电子领域的研究热点<sup>[2-4]</sup>。封装材料介于电子器件与基板或散热器之间,起到机械支撑、电气互连、传递热量的作用,可将电子器件服役时产生的热量高效导出<sup>[5]</sup>,在热管理材料中具有十分重要的地位,而导热性能是热管理材料的核心技术指标<sup>[6]</sup>。

以 SiC 和 GaN 为代表的第三代半导体材料热导率高达  $83.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。而 Sn 基焊料和导电胶<sup>[7]</sup>等传统的封装材料烧结后孔隙率较高,空气的导热系数低于  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,是热的不良导体<sup>[5,6]</sup>,故其焊接层的导热性能一般较差;钎料的热导率约为  $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,超高导热导电胶的热导率也仅为  $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。显然,传统封装材料无法匹配第三代半导体材料的散热性能,严重影响了半导体器件向微型化、高性能、高组装密度、高可靠性方向发展的进度<sup>[8]</sup>。同时 Sn 基焊料熔点较低,一般低于  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且在高温工作环境中易产生金属间化合物进而发生蠕变疲劳失效;而导电胶的服役温度更低, $>200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时粘结相(树脂)发生热老化,严重降低了电子器件服役时的可靠性,特别是在高温应用场景中的可靠性,无法满足第三代半导体器件高服役温度的要求。因此,高导热、耐高温且高服役可靠性的新型封装材料的研发是当前封装领域急需解决的问题<sup>[9-11]</sup>。

银的热导率为  $429 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,是导热性能最好的金属。纳米银具有低熔点效应<sup>[11,12]</sup>,有压环境下 $<300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 即可烧结致密,烧结层的厚度只有  $20 \mu\text{m}$ 左右,较传统焊接层厚度减薄  $60\% \sim 70\%$ ,因此连接层的导热性能显著提高,较传统软钎焊提高了 4 倍以上,模块的使用寿命提高了 10 倍左右<sup>[2]</sup>,可满足电子器件低温封装和高温服役的需求,已成为大功率半导体用高端热界面材料的主流和发展方向<sup>[13]</sup>。我国半导体企业采用的纳米银热界面材料有纳米银膏和纳米银膜两类,这两类产品均采用纳米银颗粒制备而成。纳米银膏有机物含量高,烧结后有残余,且其存储使用不便,不能实现大面积焊接,焊接后孔隙率较高,限制了其在大功率器件封装中的推广和应用。银膜中的纳米颗粒成型性差,需添加成膜助剂,影响烧结后焊料层残渣率和孔隙率的控制,且这两种产品基本依赖进口,开发国产高性能纳米银材料迫在眉睫。

本文采用湿法造纸技术将均匀分散的银纳米线溶液制备成一种兼具高纯度、高导热和高强度的纳米银纸。因电子元器件可承受的最高封装工艺温度低于  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且行业内锡基焊料、纳米银膏、纳米银膜等热界面材料的产线工艺温度一般为  $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,本文针对热界面材料的

实际应用场景展开实验。研究了纳米银纸在  $200 \sim 280 \text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内热压烧结后的导热性能和与基体的粘接强度,分析了热压烧结后纳米银纸的微观形貌及剪切断面形貌,着重分析了  $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下的综合性能。

## 2 实验

### 2.1 实验仪器及材料

实验中使用的仪器设备包括 3 层玻璃防爆反应釜 (GR-10EX, 郑州长城科工贸有限公司)、高速搅拌机 (HS-S, 上海予英仪器有限公司)、电热鼓风干燥箱 (101 型, 北京永光明医疗仪器有限公司)、热压机 (TY105F-10KN, 宁波天誉机械设备有限公司)、热重分析仪 (TG, Netzsch)、万能力学试验机 (4000, 上海馨标检测仪器制备有限公司)、激光闪射导热分析仪 (LFA477, Netzsch)、扫描电子显微镜 (MIRA3, TESCAN)。

实验中使用的材料包括镀银紫铜 (T2 态紫铜, 镀银厚度  $100 \sim 200 \text{ nm}$ , 湖南微特信新材料科技有限公司)、硝酸银 (分析纯, 中国医药集团有限公司)、聚乙烯吡咯烷酮 (PVP, 牌号 K60, 上海麦克林生化科技股份有限公司)、乙二醇 (分析纯, 天津大茂化学试剂厂)、氯化铁 (分析纯, 中国医药集团有限公司)。

### 2.2 纳米银纸的制备

#### 2.2.1 银纳米线母液的制备

将氯化铁 ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶解于乙二醇中)、乙二醇、PVP ( $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶解于乙二醇中)按照体积比  $1:20:8$  量取溶液置于 3 层玻璃防爆反应釜中,待溶液温度升至  $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,倒入硝酸银溶液 ( $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶解于乙二醇中,硝酸银溶液与 PVP 溶液体积比为  $1:1$ ),3 h 后溶液呈均匀的银灰白色时反应完成,自然冷却至室温即得银纳米线母液。

#### 2.2.2 银纳米线母液的稀释提纯

将上述银纳米线分散液按体积比  $1:5$  稀释加入  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  去离子水,在  $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度下恒温搅拌  $0.5 \text{ h}$ ,去除吸附在纳米线表层的 PVP。

#### 2.2.3 纳米银纸的成型

将上述搅拌稀释后的纳米线溶液倒入压滤机中,脱水成型,再经干燥、压制即可得到高纯度、高强度、高导热的纳米银纸。

### 2.3 纳米银纸的热压烧结

#### 2.3.1 导热性能测试样品的热压烧结过程

导热性能测试样品采用三明治结构,如图 1a 所示,分别取  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的镀银紫铜、纳米银纸和镀银紫铜,叠层后放入热压机中,在  $180 \sim 280 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ MPa}/10 \text{ min}$  工艺下热压烧结,冷却后线切割出  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的样品,采用激光闪射导热分析仪测试室温 ( $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下样

品的热扩散系数  $\alpha(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ , 通过式(1)计算即可得到样品热导率  $\lambda$ , 每个热压工艺条件下导热性能测试样品6个, 计算其平均值和标准方差:

$$\lambda = C_p \alpha \rho \quad (1)$$

其中,  $C_p$  为样品的比热容 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\rho$  为样品的密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )。文献[14]指出, 3层结构中紫铜的质量远远大于银纸的质量时, 3层结构的比热容近似于紫铜的比热容, 本文中银纸质量占铜质量的0.4%~0.6%, 故式(1)中, 3层结构的比热容约为紫铜的比热容 ( $0.385 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ), 样品的密度采用排水法测得。

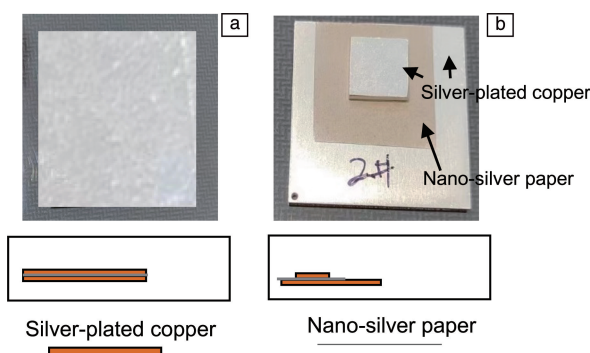


图1 热压烧结三明治结构样品及截面示意图: (a)导热性能测试样品, (b)剪切强度测试样品

Fig. 1 Pictures and cross-sectional schematic diagram of sintered sandwich structure sample: (a) thermal conductivity test sample, (b) shear strength test sample

样品热阻  $R_i(\text{mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1})$  的计算如式(2):

$$R_i = d_i / \lambda_i \quad (2)$$

其中,  $d_i$  为样品的厚度 (mm),  $\lambda_i$  为样品的热导率 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )。3层结构的热阻  $R$  计算如式(3):

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_{12} + R_{23} \quad (3)$$

其中,  $R_1$  和  $R_3$  为镀银紫铜的热阻,  $R_2$  为银纸层的热阻,  $R_{12} + R_{23}$  为银纸与上下镀银紫铜间的界面热阻和。

### 2.3.2 剪切强度测试样品的热压烧结过程

剪切强度测试样品同样采用三明治结构, 如图1b所示, 首先取  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的镀银紫铜, 放置  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的纳米银纸于镀银紫铜上, 再放置一片  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的镀银紫铜, 将3层结构置于热压机中, 在  $180 \sim 280 ^\circ\text{C} / 10 \text{ MPa} / 10 \text{ min}$  工艺下热压烧结, 冷却后即可采用万能试验机测试纳米银纸与基体间的粘结强度。每个热压工艺条件下剪切强度测试样品3个, 计算其平均值和标准方差。

## 3 结果与讨论

### 3.1 纳米银纸的形貌表征和热重分析

纳米银纸的宏观及微观形貌如图2所示, 可以看出

纳米线的直径为  $100 \sim 120 \text{ nm}$ , 该尺寸范围的纳米银线在较低温度下 ( $< 300 ^\circ\text{C}$ ) 热压烧结时就有类似于熔融状态的流动性, 即纳米银纸具有低温烧结性能。纳米银线的长度为  $20 \sim 35 \mu\text{m}$ , 银纸表层呈暗灰色, 平整光滑, 银纸厚度为  $50 \sim 55 \mu\text{m}$ , 银纸面密度为  $145 \sim 150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

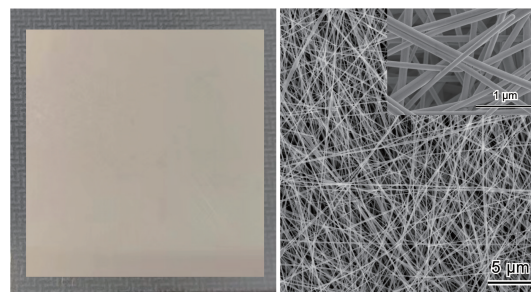


图2 纳米银纸的宏观及微观形貌

Fig. 2 Macroscopic and microscopic morphology of nano-silver paper

银纸中的主要成分是纳米银线、有机物包覆层PVP、乙二醇和水。纳米线表层吸附的PVP严重影响纳米银纸的烧结性能, 2.2.2节中使用  $40 ^\circ\text{C}$  去离子水对银纳米线母液进行搅拌稀释是为了降低纳米银线表面包覆的PVP含量。纳米银纸TG曲线如图3所示, 测试气氛是氮气, 升温速率为  $10 ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ , 从图中可知银纸最终的残留质量是99.09%。室温  $\sim 300 ^\circ\text{C}$  范围内发生乙二醇和水的挥发, 该范围内银纸的质量差即为乙二醇和水的含量, 从图中可知银纸中的乙二醇和水的含量约为0.18%。而PVP的分解温度在  $300 \sim 500 ^\circ\text{C}$  之间, 而氮气气氛下纳米银不发生氧化, 故一般认为  $300 \sim 600 ^\circ\text{C}$  范围内TG降为银纸内的PVP含量, 为0.73%。

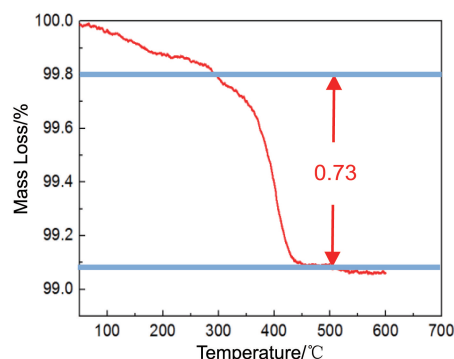


图3 纳米银纸TG曲线

Fig. 3 Thermogravimetric curve of nano-silver paper

### 3.2 纳米银纸的导热性能

#### 3.2.1 烧结温度对纳米银纸导热性能的影响

银纸在  $200 \sim 280 ^\circ\text{C}$  (因  $180 ^\circ\text{C}$  热压时银纸的粘结强度很差, 在样品的打磨抛光过程中3层结构剥离, 无法获得有效数据) 热压烧结温度下3层结构的界面热阻  $R_{12} +$



$R_{23}$  及热导率如图 4 所示。从图中可以看出, 随着烧结温度的升高, 样品的导热性能随之升高, 当烧结温度为 250 °C 时, 3 层结构的热导率高达  $362.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 占紫铜热导率 ( $401 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 的 90.40%, 紫铜与银纸间的界面热阻低至  $0.8 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。当烧结温度升高至 280 °C 时, 3 层结构的热导率高达  $389.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 界面热阻低至  $0.5 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

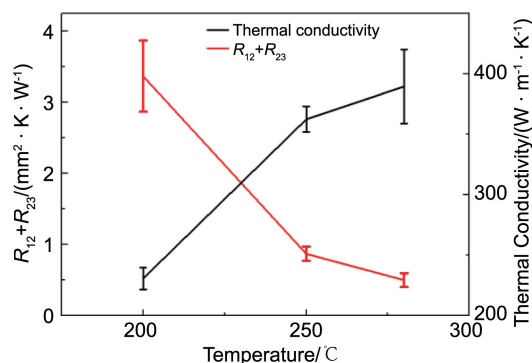


图 4 不同烧结温度下 3 层结构的界面热阻及热导率

Fig. 4 Interfacial thermal resistance and thermal conductivity of nano-silver paper at different sintering temperatures

### 3.2.2 烧结温度对纳米银纸截面形貌的影响

为进一步观察镀银紫铜间纳米银纸在热压时的烧结情况, 分析其截面形貌, 如图 5 所示。其中 5b、5d 和 5f 分别为图 5a、5c 和 5e 采用 Image J 软件处理后的照片, 黑色区域代表孔洞, 通过调节照片的对比度、亮度和阈值等, 可计算出烧结银层的孔隙率, 结果如图 6 所示。可以看出在 200~280 °C 热压烧结温度范围内, 随着烧结温度的升高, 银纸的截面孔隙率随之下降。当烧结温度为 200 °C 时, 烧结银层的孔洞较大, 孔隙率为 10.75%, 烧结银层的热传导主要靠自由电子的运动来实现, 孔洞对自由电子具有散射效应, 使其热传导性能较差。

当烧结温度为 250 °C 时, 烧结银层致密化程度明显提高, 孔隙率低至 4.8%。当烧结温度升高至 280 °C 时, 烧结银层截面组织结构较 250 °C 没有发生明显粗化, 但孔洞进一步减少, 基本不存在大的孔洞, 仅有纳米或亚微米级的孔洞均匀分布在烧结银层中, 烧结致密化程度很高, 孔隙率仅为 2.56%, 故烧结银界面层热传导的散射效应很弱, 烧结体的导热性能较好。

### 3.2.3 烧结温度对纳米银纸表面微观形貌的影响

因 3 层结构热压后无法观察银层的表面形貌, 而烧结银层中晶粒大小和孔隙多少是影响导热性能的关键, 故分析单层纳米银纸在不同热压烧结温度下的表面微观形貌。图 7a 和 7b 为烧结温度 180 °C 时纳米银纸的表面形貌, 纳米银线的直径约为 120~180 nm, 局部融合部分

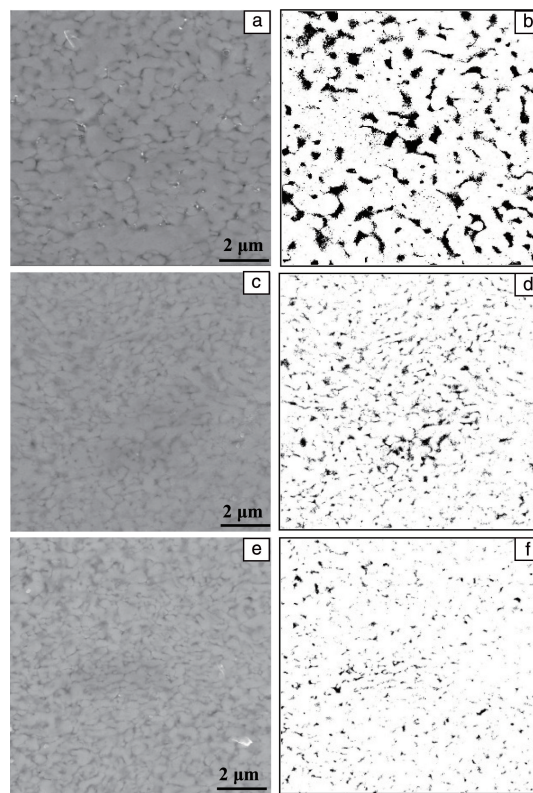


图 5 不同烧结温度下纳米银纸的截面形貌: (a, b) 200 °C, (c, d) 250 °C, (e, f) 280 °C

Fig. 5 Cross-sectional morphology of nano-silver paper at different sintering temperatures: (a, b) 200 °C, (c, d) 250 °C, (e, f) 280 °C

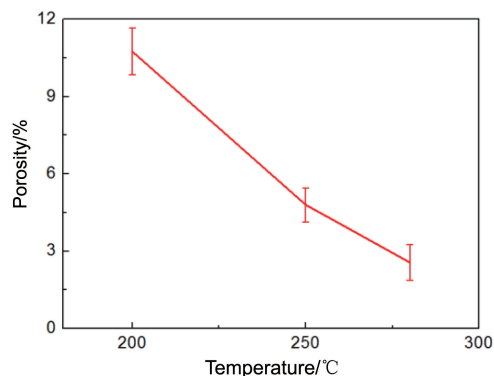


图 6 不同烧结温度下纳米银纸的截面孔隙率

Fig. 6 Cross-sectional porosity of nano-silver paper at different sintering temperatures

的直径达到 200~230 nm, 明显大于图 2b 中原始未烧结纳米线的直径, 说明 180 °C 烧结温度下纳米线开始粗化长大, 局部出现融合, 初步形成烧结颈 (如图 7b 红色圈中所示, 融合是指两个小尺寸的纳米银结合成大尺寸纳米银的过程<sup>[15]</sup>), 但此时烧结温度较低, 烧结驱动力不够, 表面仍是疏松多孔结构, 纳米银线基本处于未烧结的状态, 热传导主要依靠纳米银线之间的接触, 故此时粘结强度较差。



当热压烧结温度升高到 200 ℃ 时, 如图 7c 和 7d 所示, 银纸表面具有明显的烧结行为, 纳米线逐渐粗化, 直径达到 230~280 nm, 烧结颈进一步长大, 纳米线线型逐渐消失, 同时析出尺寸为 50~80 nm 的纳米颗粒和纳米短棒, 整个结构趋向于致密化, 烧结体的导热性能提高。

当烧结温度为 250 ℃ 时, 如图 7e 和 7f 所示, 银线在烧结驱动力的作用下进一步粗化, 尺寸达到 400 nm 以上, 析出的细小纳米颗粒数量增多, 纳米线线型结构基本消失。烧结体晶粒粗化长大, 同时伴随着晶界的减少, 纳米银纸烧结体的导热性能进一步提高。从图 4 可以看

出此时 3 层烧结结构样品的热导率较 200 ℃ 明显提高。

当烧结温度为 280 ℃ 时, 如图 7g 和 7h 所示, 原始的纳米银线完全消失, 晶粒继续熟化长大(熟化是指小尺寸纳米银表面的银原子在烧结过程中逐渐向相邻的大尺寸纳米银表面凝聚析出, 大尺寸纳米银不断长大, 而小尺寸纳米银不断缩小直至消失), 组织致密化, 孔洞基本消失。由于再结晶和致密化在烧结过程中同时发生, 烧结银层逐渐形成致密的烧结结构<sup>[16]</sup>, 故此时表现出超高的热导率, 3 层结构样品的界面热阻低至  $0.5 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , 完全满足第三代半导体材料的散热要求。

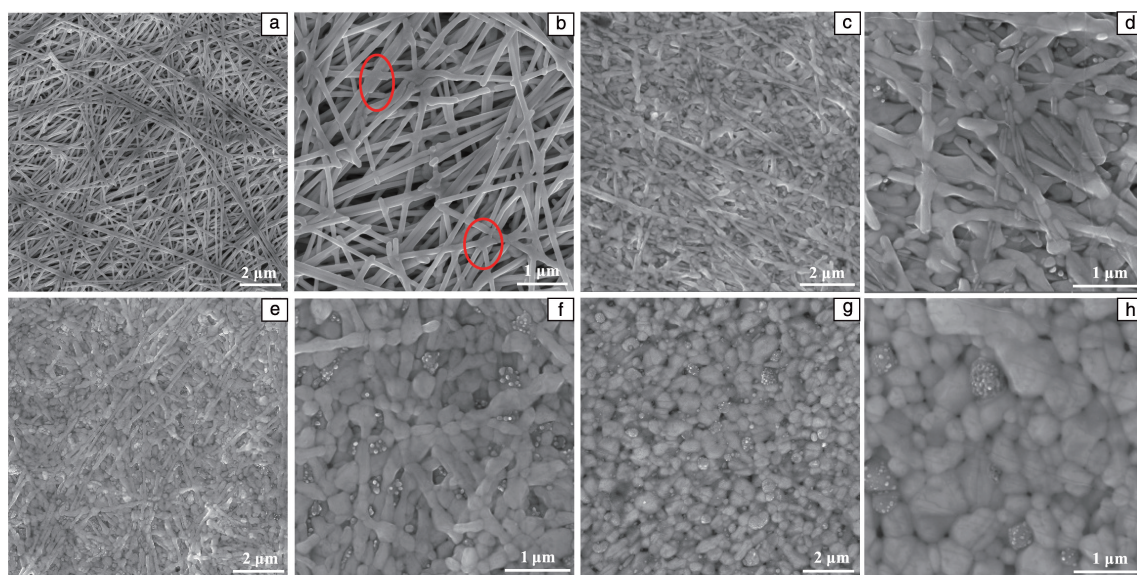


图 7 不同烧结温度下纳米银纸的表面形貌: (a, b) 180 ℃, (c, d) 200 ℃, (e, f) 250 ℃, (g, h) 280 ℃

Fig. 7 Surface morphology of nano-silver paper at different sintering temperatures: (a, b) 180 ℃, (c, d) 200 ℃, (e, f) 250 ℃, (g, h) 280 ℃

### 3.3 烧结温度对纳米银纸与镀银紫铜间剪切性能的影响

3 层结构样品的剪切强度测试如图 8 所示, 将热压烧结后的样品放入工装模具中, 即可测得剪切推力  $F$  的大小。银纸在不同热压烧结温度下 3 层结构的剪切强度如图 9, 从图中可以看出, 随着烧结温度的升高, 样品的室温剪切强度和高温剪切强度均随之升高, 当烧结温度为 250 ℃ 时, 室温剪切强度为 39 MPa, 400 ℃ 高温剪切强度为 13 MPa。

室温下测试剪切强度样品的断口形貌如图 10 所示。从图 10a 和 10b 可以看出, 当烧结温度为 180 ℃ 时, 纳米银线开始粗化, 银线之间形成了比较细的烧结颈, 整体结构疏松多孔。纳米银层表面完好, 剪切时基本没有损坏, 银层的强度较好。由此可以判断, 烧结温度较低时纳米银因低熔点效应已开始烧结粗化, 但此时纳米银与紫铜镀银中的多晶银之间的烧结驱动力不够, 导致纳米银与紫铜镀银层之间的结合很弱, 断裂发生在紫铜镀银层和烧结银层之间。

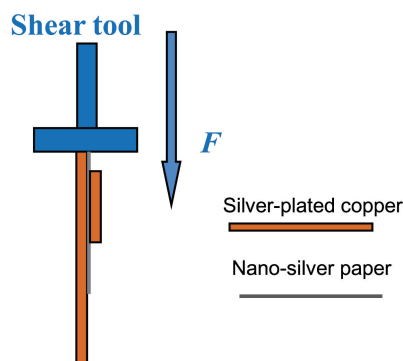


图 8 剪切强度测试示意图

Fig. 8 Schematic diagram of shear strength test

当烧结温度升高到 200 ℃ 时, 从图 10c 和 10d 可以看出银线之间的烧结颈粗化更加明显, 组织逐渐长大, 烧结体更加致密, 形成了稳定的三维网状烧结结构。同时观察到紫铜镀银层与纳米银层之间的断裂和纳米银层内部的断裂, 说明随着烧结温度的升高, 紫铜镀银层与

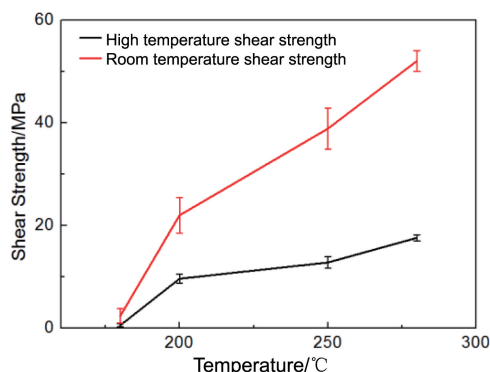


图 9 不同烧结温度下纳米银纸与基体间的剪切强度

Fig. 9 Shear strength between nano-silver paper and matrix at different sintering temperatures

纳米银层之间的连接强度增加, 已经与纳米银层内部的连接强度大致相当。

当烧结温度继续提高至 250 和 280 °C 时(图 10e ~ 10h), 上下镀银紫铜上均匀弥散分布着纳米烧结银层, 而不是只在一面镀银紫铜上, 说明断裂发生在烧结银层, 纳米银纸与镀银紫铜间形成了良好的冶金结合。烧结体组织更加粗化和致密, 断口呈明显的韧窝状, 这说明纳米银层内部的断裂方式主要是塑性断裂。同时烧结银层与紫铜镀银层之间的接触面积越来越大, 形成了良好的冶金结合, 烧结互连结构稳定可靠。

本文针对热界面材料的实际应用场景展开实验, 发现在 250 °C/10 MPa/10 min 热压条件下, 烧结银层的孔隙率低于 5%, 烧结体致密, 同时析出大量的细小纳米颗粒, 对烧结体的导热性能有利, 界面热阻可以忽略, 同时纳米银纸与紫铜镀银层形成良好的冶金结合, 室温剪切强度高达 39 MPa。

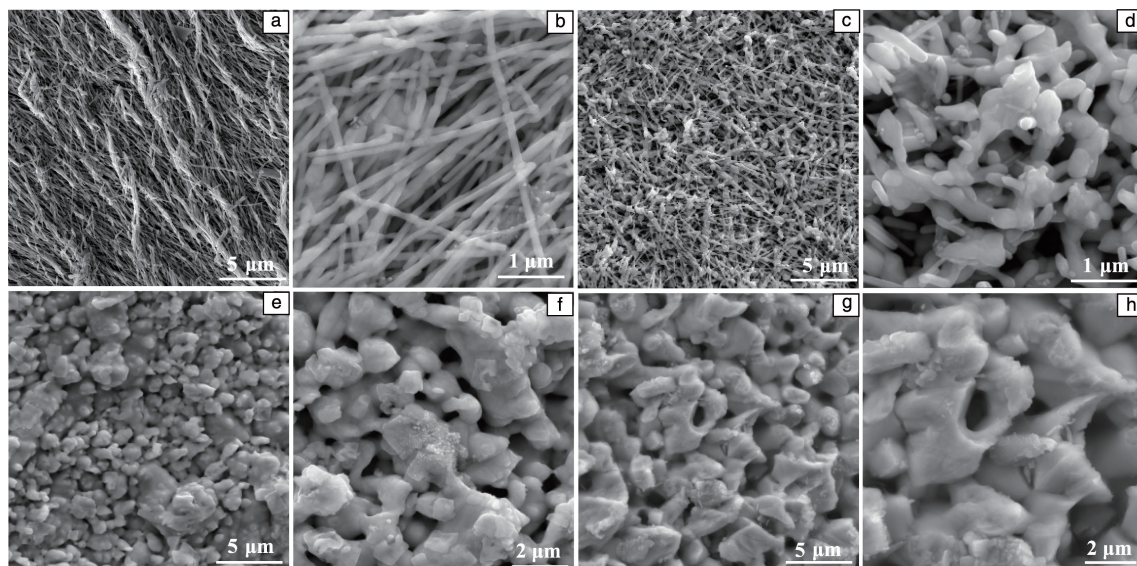


图 10 不同烧结温度下纳米银纸的室温剪切断口形貌: (a, b) 180 °C, (c, d) 200 °C, (e, f) 250 °C, (g, h) 280 °C

Fig. 10 Fracture morphology at room temperature shear of nano-silver paper at different sintering temperatures: (a, b) 180 °C, (c, d) 200 °C, (e, f) 250 °C, (g, h) 280 °C

## 4 结 论

Sn 基焊料和导电胶导热性能较差, 纳米银膜和纳米银膏作为新型高端热界面材料, 烧结时银层孔隙率较高, 使用纳米银纸作为热界面材料可以实现超高的热导率, 界面热阻低于  $0.8 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , 导热性能更好; 与基体间的室温剪切强度高达 39 MPa, 400 °C 高温剪切强度高达 13 MPa, 服役可靠性更高, 是最有可能成为国产第三代半导体的封装热界面材料。

### 参考文献 References

[1] 文丽, 王翠梅. 新材料产业[J], 2014, 3: 13-17.

WEN L, WANG C M. New Material Industry[J], 2014, 3: 13-17.

[2] 李帅, 白欣娇, 袁凤坡, 等. 微纳电子技术[J], 2020, 57(2): 163-168.

LI S, BAI X J, YUAN F P, *et al.* Micronanoelectronic Technology [J], 2020, 57(2): 163-168.

[3] 马立民, 鲁子怡, 贾强, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2024, 53(1): 296-320.

MA L M, LU Z Y, JIA Q, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2024, 53(1): 296-320.

[4] 蔺浩博, 刘宁涛, 吴思淼, 等. 中国材料进展[J], 2023, 42(4): 277-288.

LIN H B, LIU N T, WU S M, *et al.* Materials China[J], 2023, 42(4): 277-288.

- [5] 王新刚, 张润梅, 陈典典, 等. 中国材料进展[J], 2018, 37(12): 1010-1016.  
WANG X G, ZHANG R M, CHEN D D, *et al.* Materials China[J], 2018, 37(12): 1010-1016.
- [6] 何鹏, 耿慧远. 材料工程[J], 2018, 46(4): 1-11.  
HE P, GENG H Y. Journal of Materials Engineering[J], 2018, 46(4): 1-11.
- [7] 陈军君, 傅岳鹏, 田民波. 半导体技术[J], 2008, 33(3): 140-189.  
CHEN J J, FU Y P, TIAN M B. Semiconductor Technology[J], 2008, 33(3): 140-189.
- [8] 王尚, 田艳红. 材料科学与工程[J], 2017, 25(5): 1-5.  
WANG S, TIAN Y H. Materials Science and Technology[J], 2017, 25(5): 1-5.
- [9] 史铁林, 李俊杰, 朱朋莉, 等. 集成技术[J], 2021, 10(1): 3-13.  
SHI T L, LI J J, ZHU P L, *et al.* Journal of Integration Technology[J], 2021, 10(1): 3-13.
- [10] 李俊龙, 徐杨, 赵雪龙, 等. 焊接学报[J], 2022, 43(3): 13-43.  
LI J L, XU Y, ZHAO X L, *et al.* Transactions of the China Welding Institution[J], 2022, 43(3): 13-43.
- [11] 任辉, 张宏强, 王文淦, 等. 中国激光[J], 2021, 48(8): 120-134.  
REN H, ZHANG H Q, WANG W G, *et al.* Chinese Journal of Lasers[J], 2021, 48(8): 120-134.
- [12] 焦晓飞, 史子峥, 景天宇, 等. 微纳电子技术[J], 2021, 58(7): 646-651.  
JIAO X F, SHI Z Z, JING T Y, *et al.* Micronanoelectronic Technology[J], 2021, 58(7): 646-651.
- [13] 何天贤, 李志豪. 焊接设备与材料[J], 2017, 46(5): 105-109.  
HE T X, LI Z H. Welding Equipment and Materials[J], 2017, 46(5): 105-109.
- [14] YU H, LI L L, ZHANG Y J. Scripta Materialia[J], 2012, 66: 931-934.
- [15] WANG S, LI M Y, JI H J, *et al.* Scripta Materialia[J], 2013, 69(11/12): 789-792.
- [16] TANG Y, HE W, WANG S, *et al.* CrystEngComm[J], 2014, 16(21): 4431-4440.