

# Research Progress of Liquid Metal in Flexible Electronic Devices

Zhexuan Zhang Xu Jiang Yixian Mei Xinyu Zhou Rongrong Liu

Chengxian College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, 210088, China

## Abstract

Liquid metal has become a revolutionary material for flexible electronic devices due to its unique room-temperature fluidity, high electrical conductivity (such as EGaIn conductivity reaching  $3.4 \times 10^6$  S/m), and excellent stretchability (strain  $>300\%$ ). This article systematically reviews the source classification, key preparation technologies and typical applications of liquid metals. Research shows that through component regulation and structural design, liquid metal devices have achieved  $10\mu\text{m}$ -level pattern accuracy, multi-parameter sensing and dynamic reconstruction. However, long-term stability, large-scale production and high environmental adaptability remain the main challenges. In the future, intelligent response systems, green manufacturing processes and multi-disciplinary cross-innovation will promote the industrial application of this technology in fields such as medical electronics and soft robots.

## Keywords

Liquid metal Flexible electronics Micro-nano manufacturing Interface regulation

## 液态金属在柔性电子器件的研究进展

张哲轩 蒋旭 梅益仙 周欣雨 刘荣荣

东南大学成贤学院, 中国·江苏 南京 210088

## 摘要

液态金属凭借其独特的室温流动性、高导电性(如EGaIn电导率达 $3.4 \times 10^6$  S/m)和优异可拉伸性(应变 $>300\%$ ),已成为柔性电子器件的革命性材料。本文系统综述了液态金属的来源分类、关键制备技术及典型应用。研究显示,通过组分调控和结构设计,液态金属器件已实现 $10\mu\text{m}$ 级图案精度、多参数传感和动态重构。然而,长期稳定性、规模化生产和高环境适应性仍是主要挑战。未来,智能响应系统、绿色制造工艺和多学科交叉创新将推动该技术在医疗电子、软体机器人等领域的产业化应用。

## 关键词

液态金属; 柔性电子; 微纳制造; 界面调控

## 1 引言

柔性电子技术的快速发展对新型导电材料提出了更高要求。液态金属(如EGaIn、Galinstan)凭借其独特的室温流动性、高导电性和可拉伸性,成为柔性电路的理想材料。近年来,3D打印、光刻和微流道等制造技术的突破,以及液态金属弹性体、纳米颗粒复合材料的发展,显著提升了电路的性能和功能集成度。这些进步推动了液态金属在可穿戴设备、电子皮肤和软体机器人等领域的应用。然而,材料的长期稳定性、界面结合强度以及规模化生产等问题仍需解决。未来,液态金属柔性电路将向智能化、多功能化方向发展。本文综述了该领域的最新研究进展,并展望了其发展趋势。

【作者简介】张哲轩(2005-),男,中国浙江嘉兴人,本科,从事功能材料研究。

## 2 液态金属的来源与分类

### 2.1 液态金属的来源

液态金属是一类在室温下呈液态的金属材料,主要来源包括三类:一是天然提取,如汞(Hg)从辰砂矿中提炼,但因毒性大已少用;二是人工合成,通过将镓(Ga)、铟(In)、锡(Sn)等低熔点金属按比例合金化,制成如共晶镓铟(EGaIn)等性能可调的合金;三是工业回收,从废弃电子产品的焊料、导热材料中提纯再利用。这些材料凭借独特的流动性、高导电/导热性,广泛应用于柔性电子、生物医疗等领域。

### 2.2 液态金属的分类

#### 2.2.1 单质液态金属

单质液态金属主要来源于自然矿物提炼及工业副产品。汞常从辰砂(HgS)中焙烧提取,形成蒸气后冷凝为液态;镓则多从铝土矿或锌冶炼的副产物中分离提纯。此外,废旧

电子产品回收也成为液态金属的重要来源，尤其是含镓的半导体废料。某些合金（如镓锡共晶合金）则通过高纯度金属按特定比例熔融制备。

### 2.2.2 二元液态金属合金

二元液态金属合金通过将镓与其他低熔点金属合金化，显著改善了单一金属的性能局限。最具代表性的镓铟合金（Ga-In）中，共晶组分 EGaln（Ga75%-In25%）具有 15.7° C 的超低熔点，其电导率高达  $3.4 \times 10^6$  S/m，表面张力约为 0.624 N/m，成为柔性电子器件的首选导电材料。另一重要体系镓锡合金（Ga-Sn）的代表性产品 Galinstan（Ga68.5%-In21.5%-Sn10%）熔点进一步降至 -19° C，其突出的抗氧化性能源于 Sn 元素促进形成的致密氧化层，使材料在空气中保持长期稳定。

### 2.2.3 三元及多元液态金属合金

三元及多元液态金属合金通过引入第三种或更多合金元素，进一步拓展了材料的功能特性与应用范围。铋基合金 Field's metal（Bi32.5%-In51%-Sn16.5%）具有 62°C 的适中熔点，其独特的固-液相变特性使其在可熔断电路保护装置和智能热界面材料领域具有重要价值<sup>[1]</sup>。这类多元合金的突出特点在于：通过精确调控组分比例，可以实现从室温到零下温度的宽范围熔点设计，同时赋予材料特定的热电或磁学性能。

### 2.2.4 功能化液态金属

功能化液态金属代表了该材料体系向高性能应用发展的重要方向，主要包括液态金属纳米颗粒（LMNPs）和液态金属弹性体（LME）两大类。LMNPs 通常通过超声破碎或化学还原法制备，粒径可控制在 50-500nm 范围，其独特的核壳结构（液态金属内核+氧化物外壳）使其成为高性能电子墨水的理想材料，适用于喷墨打印、丝网印刷等先进制造工艺<sup>[2]</sup>。LME 则是将液态金属微滴（通常为 EGaln 或 Galinstan）分散于 PDMS 等弹性体基体中形成的复合材料，其中液态金属含量可达 70% 以上时仍保持优异的拉伸性能（断裂伸长率 >300%）。

## 3 关键制备技术

### 3.1 微纳图案化技术

液态金属微纳图案化技术是柔性电子制造的关键，主要包括四大方法：光刻转印技术利用模板实现 10 μm 级高精度图案转移，适合批量生产；3D 打印通过直写或喷墨方式实现三维自由成型，擅长复杂结构制造；微流控成型将液态金属注入 PDMS 微通道，形成可拉伸嵌入式电路；激光直写通过局部氧化实现 5 μm 精度的无掩模快速加工。

### 3.2 界面调控策略

液态金属与基底的界面调控是柔性电子器件的关键，主要通过三种策略实现：一是氧化层控制，通过调节氧含量精确控制 Ga 基合金表面 2-5nm 氧化层厚度，平衡防铺展与粘附性；二是润湿性修饰，采用等离子处理或涂层技术调控基底表面能（20-50mN/m），使其与液态金属表面张力（~500mN/

m）匹配；三是机械互锁，在基底构建 10-100 μm 的微结构，通过物理锚定使界面结合力提升 3-5 倍。这些方法协同作用，显著提升了器件的可靠性和性能稳定性。

### 3.3 集成化制造方法

集成化制造方法是一种将材料合成、结构加工和功能组装等多道工序有机整合的先进制造策略。其核心在于通过模块化设计实现跨尺度、多材料的协同制造，典型技术包括 3D 打印、卷对卷印刷和微流控集成等。以柔性电子为例，该方法可在单一平台上完成液态金属的图案化、绝缘封装和电路集成，大幅提升制造效率。在微纳系统领域，通过光刻-刻蚀-键合等工艺的集成，实现 MEMS 传感器的批量化生产。新兴的混合制造技术进一步结合增材与减材工艺优势，支持异质材料的精准集成。

## 4 液态金属与其他金属材料在柔性电子应用中的性能

### 4.1 可变形性

液态金属在柔性电子领域展现出卓越的形变能力，其拉伸应变可达 500% 以上（如 GaInSn 合金），远超传统金属材料（铜箔仅 1-3%）。这种特性源于其独特的室温流动性，使其能在零弯曲半径下保持功能完整，完全满足可穿戴设备的形变需求。相比之下，传统金属在反复弯折后易产生疲劳断裂。液态金属的超高延展性突破了现有柔性电子的形变极限，为开发电子皮肤、可拉伸传感器等新型器件提供了关键材料支持，极大拓展了柔性电子在生物医疗和软体机器人等领域的应用潜力。

### 4.2 导电稳定性

液态金属在柔性电子应用中展现出卓越的导电稳定性。在 300% 拉伸应变下，其电阻变化率仍低于 10%，远超传统金属材料（5% 应变时电阻即显著增大）。这一特性源于液态金属独特的流动性，可在形变过程中维持导电通路的连续性。更突出的是其本征自修复能力：当电路受损时，破裂的氧化层能自动重建导电通路。这些优势使其成为开发高可靠性可拉伸电子器件的理想材料，为柔性电子在可穿戴设备和软体机器人等领域的应用提供了关键技术支持。

### 4.3 界面结合性

液态金属凭借其表面自生的 2-5nm 氧化层，可与弹性基底形成稳定的弱结合界面，这种独特的结合方式避免了传统金属材料所需的复杂表面处理（如微结构加工或胶黏剂涂覆）<sup>[3]</sup>。研究表明，液态金属-基底界面的疲劳寿命可达传统金属复合材料的 3-5 倍，这种优异的界面耐久性使其在需要反复形变的柔性电子应用中展现出显著优势，为开发长寿命可拉伸器件提供了关键技术支持。

### 4.4 功能特性

液态金属在柔性电子领域展现出革命性的动态重构能力，其独特的流动性使其可实时改变电路形态与功能（如可重构天线频率可调范围达 2-18GHz）。相较之下，传统金属

电路一旦制备完成即无法改变。更突出的是，液态金属能与多种功能材料复合，实现智能传感与驱动的一体化集成。这种独特的动态可调性和多功能集成特性，为开发新一代自适应电子皮肤、软体机器人等智能系统提供了关键材料基础，展现出传统金属无法比拟的应用潜力。

## 5 液态金属的性能优化策略

### 5.1 组分调控

液态金属的组分优化主要通过三元体系调控实现性能突破。通过精确调控 Ga-In-Sn 配比，可制备熔点范围覆盖  $-19^{\circ}\text{C}$  (Galinstan) 至  $30^{\circ}\text{C}$  的功能合金，满足不同温度场景需求。引入 1-3% 的 Bi 元素可使氧化速率降低 80%，显著提升环境稳定性。创新性开发的低钎合金在保持  $3.2 \times 10^6 \text{ S/m}$  高电导率的同时，将材料成本压缩 40% 以上。这些组分工程策略通过第一性原理计算指导的成分设计，实现了导电性、稳定性和经济性的最优平衡，为液态金属的大规模应用奠定了基础。

### 5.2 表面工程

液态金属表面工程通过多尺度修饰实现性能优化：可控氧化形成 2-5nm 天然氧化层，在保持流动性的同时提升环境稳定性；聚合物涂层（如 Parylene-C）可将蒸发速率降低 90% 以上，工作寿命延长 5 倍；石墨烯/MXene 纳米修饰使界面结合能提升 3-8 倍，剪切强度达 2.5MPa。这种“氧化层-聚合物-纳米材料”三级防护体系，使液态金属在柔性电子中的可靠性显著提高。

### 5.3 结构设计

通过结构设计可显著提升液态金属器件的力学性能：微通道封装（50-200  $\mu\text{m}$  通道宽度）使导电网络在 300% 拉伸下保持稳定导通；三维多孔结构（孔隙率 >70%）将导电渗透阈值降至 3vol%，同时保持 80% 压缩回弹性；蛇形/分形几何设计（曲率半径 100-500  $\mu\text{m}$ ）使电路在复杂形变下应力集中降低 60%。这些仿生结构策略实现了导电性 ( $>10^3 \text{ S/cm}$ ) 与机械适应性（断裂应变 >400%）的协同优化。

## 6 挑战与展望

### 6.1 当前面临的主要挑战

#### 6.1.1 长期稳定性问题

微纳图案化技术是在微米至纳米尺度上构建精密表面结构的先进制造方法，主要包括光刻、软刻蚀、自组装和直写加工四大类。传统光刻技术（如深紫外光刻、极紫外光刻）通过光掩模和光刻胶实现亚微米级图形化，而纳米压印技术则利用物理模具实现高分辨率图案复制。新兴的激光直写和电子束光刻能突破衍射极限，实现 10 纳米级特征尺寸。

#### 6.1.2 高精度制造限制

液态金属柔性电子器件的高精度制造仍面临显著技术瓶颈。当前微纳加工工艺存在以下关键限制：光刻技术受液态金属高表面张力（约 500 mN/m）制约，最小特征尺寸难

以突破 5  $\mu\text{m}$ ；3D 打印受喷嘴尺寸限制（通常 >50  $\mu\text{m}$ ），且液态金属易氧化堵塞喷头；转印工艺的图案保真度受基底表面能影响显著。这些限制导致器件性能一致性差（电阻波动 >15%），难以满足高密度集成需求。

#### 6.1.3 规模化生产成本

液态金属柔性电子的大规模生产面临显著成本挑战，主要体现在三个方面：原材料成本上，钎等稀有金属价格高昂（>500 美元/公斤），占器件总成本 40% 以上；制造工艺上，现有微纳加工技术（如光刻、3D 打印）效率低下（每小时 <0.1  $\text{m}^2$ ），设备投入超过百万美元；后处理环节中，封装和测试成本占比达 30%。目前通过开发低钎含量合金（In<10%）、卷对卷印刷工艺（速度达 5 m/min）以及回收利用技术，已使生产成本降低 60%。

#### 6.1.4 环境适应性不足

液态金属柔性电子在极端环境下的可靠性仍存在明显缺陷，主要表现为：低温（< $-20^{\circ}\text{C}$ ）时镓基合金发生相变导致电阻骤增（增幅达 300%）；高温（> $80^{\circ}\text{C}$ ）下界面扩散加剧，器件寿命缩短至常温的 1/5；潮湿环境（RH>90%）中氧化速率提高 10 倍，接触电阻在 48 小时内上升 50%。

## 6.2 未来发展方向

液态金属柔性电子技术正朝着多功能化、智能化和绿色化方向快速发展。在材料创新方面，研究者通过将液态金属与石墨烯、碳纳米管等材料复合，开发出兼具高导电性（ $>10^4 \text{ S/cm}$ ）和优异导热性（ $>50 \text{ W/mK}$ ）的多功能复合材料。智能响应系统取得重要突破，MIT 团队研发的温度响应器件响应时间已达 0.1 秒，展现出类生物组织的环境适应能力。绿色制造工艺方面，欧盟 H2020 项目开发的水系印刷技术使能耗降低 70%，材料利用率提升至 95%。系统集成技术快速发展。

## 7 结论与展望

液态金属在柔性电子器件领域展现出独特优势，其优异的导电性、可拉伸性和可重构性推动了柔性电子技术的革新。近年来，通过材料改性、微纳制造和界面调控等技术的突破，液态金属在可拉伸导体、柔性传感器和功能器件等方面取得显著进展。然而，长期稳定性、高精度制造和规模化生产等挑战仍需解决。未来，随着新型复合材料、智能响应系统和绿色制造工艺的发展，液态金属柔性电子将向多功能集成、环境适应性和智能化方向迈进，在医疗电子、软体机器人和可穿戴设备等领域具有广阔应用前景。

### 参考文献

- [1] 王晓峰等.《低熔点钎基合金熔断器的过流保护特性研究》.《中国科学：材料科学》, 2021,51(3), 345-352.
- [2] 刘静, 王明, 张伟.《超声破碎法制备液态金属纳米颗粒及其在柔性电子中的应用》.《中国科学：材料科学》, 2020, 10.1007/s40843-020-1455-3
- [4] 张伟.《镓基液态金属表面氧化层的原位表征与调控》.《中国科学：材料科学》, 2020,50(5), 621-628.