

半导体塑性加工研究获进展

半导体材料因丰富可调的功能特性得到应用，但室温下通常表现为脆性，难以像金属一样进行简单高效的塑性加工，而是广泛依赖一系列高度精细制备和精密加工技术，且成本高、工艺流程复杂。近年来，研究人员陆续发现了一些宏观尺度具有室温塑性的无机半导体材料，为半导体的制造方法提供了新方案。然而，具有室温塑性的半导体材料种类仍极为稀缺，物理性能无法满足半导体行业的应用需求。因此，针对数量与种类庞大的半导体材料开展新颖的塑性加工技术，不仅具有重要的科学研究价值，而且有望变革现有的半导体制备加工工艺。

近期，中国科学院上海硅酸盐研究所与上海交通大学合作，发现一批脆性半导体在500 K以下具有良好塑性变形和加工能力，从而提出运用经典金属“温加工”方法来制备高质量、自支撑、厚度可调的高性能半导体薄膜，并在此基础上研制出高功率密度的热电器件。

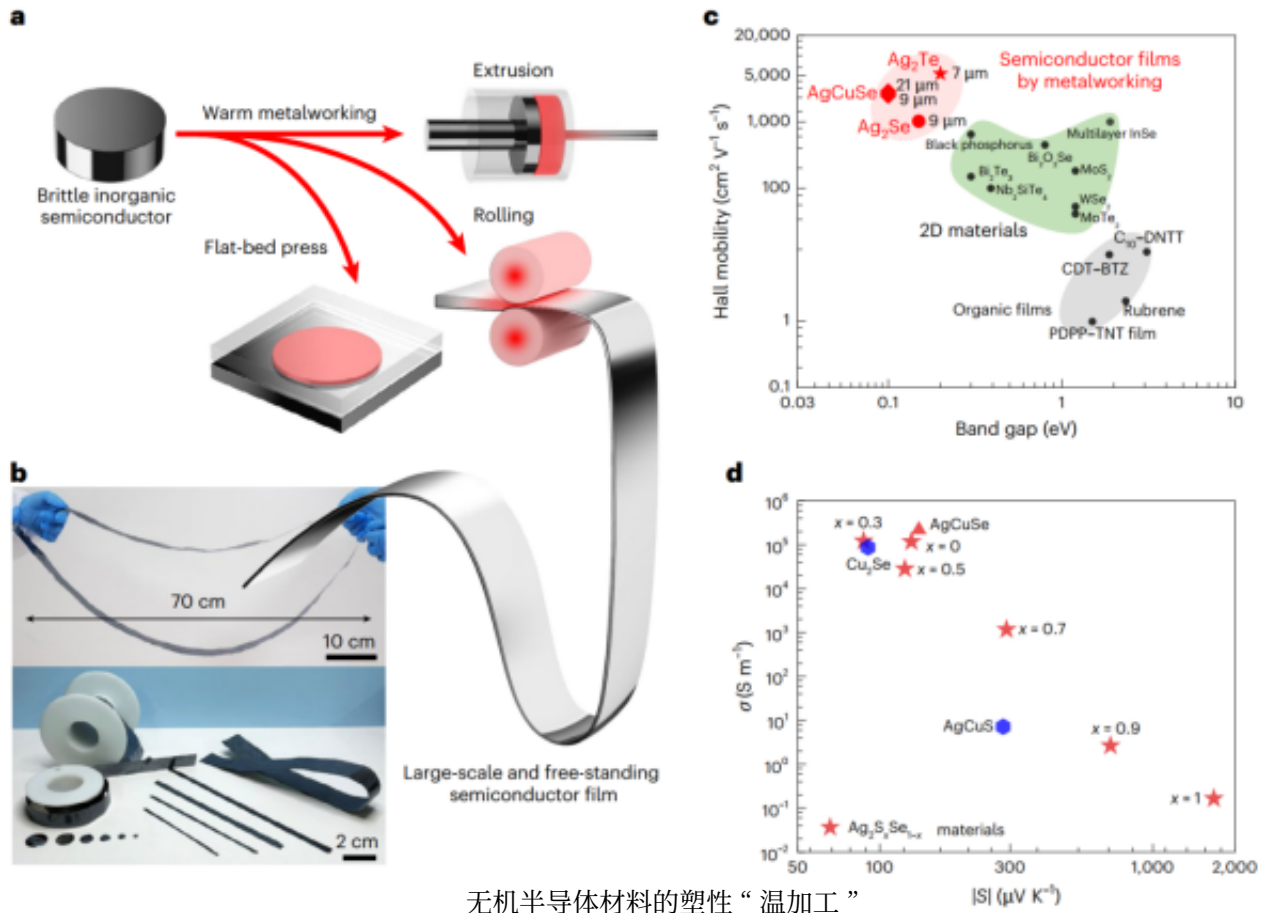
温度是诱导塑性形变的重要因素，大部分材料在高温下更易塑性成型。但是，多数半导体和陶瓷等无机非金属材料“脆转变温度”过高，热加工难度大、成本高。该研究发现，一系列典型的窄禁带无机半导体如Cu₂Se、Ag₂Se、Bi₉₀Sb₁₀可在略高于室温的条件下（400-500 K）进行辊压轧制、平板压、挤压等塑性“温加工”。例如，在420 K下辊轧得到的Ag₂Se条带可达0.9米长，对应轧制延伸率达3000%。同时，这些塑性加工后的材料保留了块体优良的物理性能。例如，厚度仅为数微米的Ag₂Se、Ag₂Te、AgCuSe等辊压膜的迁移率达1000-5000 cm²/Vs，高于多数二维材料和有机薄膜。因此，与溅射、蒸发和化学气相沉积等无机半导体经典制备技术相比，塑性“温加工”方法在制造高质量半导体膜方面具有如下优势：避免了衬底带来的各种限制和额外成本；在微米至毫米范围内自由调控薄膜厚度；薄膜结晶性好、元素分布均匀，较好地继承了块体材料优异可调的物理性能。

塑性“温加工”后的材料表现出丰富的微观组织结构。微结构分析表明，此类材料在略高于室温下发生塑性变形的机制与金属中不同，主要依赖晶粒的重整变形以及晶格的扭转畸变。进一步，根据“易滑移、难解理”的能量耗散原理，研究量化阐释了解理能和滑移能垒随温度的依赖关系，并以两者比值作为经验性的塑性因子，提出了变温塑性模型。该模型可计算与预测无机非金属材料“脆转变温度”，与实验数据高度吻合。

塑性“温加工”方法获得的高性能自支撑半导体在电子和能源器件方面颇有应用前景。以热电能量转换为例，该研究选取Cu₂Se、Ag₂Se、Mg₃Bi_{1.5}Sb_{0.49}Te_{0.013}种高性能热电材料的辊压薄片，采用表面喷砂粗化和磁控溅射工艺在薄片上下表面构筑功能化金属层，进而经过热电臂切割、转移和一体化集成焊接等工艺，研制了两种面外型薄膜热电器件。其中，器件1#由17对p-Cu₂Se与n-Ag₂Se组成，填充率27.5%；器件2#由6对p-Cu₂Se与n-Mg₃Bi_{1.5}Sb_{0.49}Te_{0.01}器件组成，填充率54.5%。得益于热电薄片的高功率因子以及热电臂-电极间的高强低阻界面，两种器件的最大归一化功率密度达到43-54 μW cm⁻² K⁻²，约为先前报道的Ag₂S基薄膜热电器件的2倍。

上述工作建立了温度相关的塑性物理模型，在半导体中实现了类似金属的塑性加工工艺，为丰富无机半导体加工制造技术、拓展应用场景提供了支撑。

相关研究成果以Warm Metalworking for Plastic Manufacturing in Brittle Semiconductors为题，发表在《自然-材料》（Nature Materials）上。研究工作得到国家重点研发计划和国家自然科学基金的支持。



无机半导体材料的塑性“温加工”

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/226496.html>