

具有室温延展性的新型无机半导体材料:  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S

李秋瑾, 孙靖宇\*

苏州大学能源与材料创新研究院, 苏州 215006

\* 联系人, E-mail: sunjy86@suda.edu.cn

在传统材料中, 金属材料 and 合金具有室温延展性, 金属键在外力作用下可以产生塑性形变, 其形变张力可达5%~100%<sup>[1,2]</sup>. 而无机半导体材料和陶瓷绝缘材料通常都属于脆性材料, 只有不到0.1%~0.2%的形变张力.

中国科学院上海硅酸盐研究所陈立东和史迅研究组与德国马普所Yuri Grin研究所<sup>[3]</sup>合作, 首次报道了一种在室温条件下具有类似金属的优异延展性的无机半导体材料:  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S. 其具有反常于常规无机半导体材料的力学性能, 特别是拥有良好的可延展性及弯曲性, 有望在柔性电子学领域获得广泛应用, 相关研究2018年4月9日在线发表于*Nature Materials*<sup>[3]</sup>.  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S晶体在室温下具有锯齿形的褶皱层状单斜结构, 带隙约1.03 eV; 其室温电导率0.09~0.16 S m<sup>-1</sup>, 且电性能在半导体区间可实现自由调控.

Shi等人<sup>[3]</sup>通过铸锭浇注法和放电等离子烧结法制备得到 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S体相材料. 他们发现这种 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S材料的延展性比其他半导体提高了几个数量级, 甚至优于一些合金材料, 其拉伸张力可达4.2%, 压缩张力高达50%以上, 弯曲张力超过20%(图1); 而传统的半导体材料通常难以承受任何塑性形变. 具有优异延展性的 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S材料的发现则打破了半导体材料脆性的定律.

$\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S材料的优异延展性主要是源于其本征的结构和化学键. 满足延展性的条件主要有2点: (1) 可以实现原子、缺陷或者界面沿特定晶面的滑移(具有较小的滑移能垒 $\Delta E_B$ ); (2) 滑移面内具有相对强的原子间作用力以保证材料的完整性(具有较大的分裂能 $\Delta E_C$ ). 综合来看,  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S具有很小的滑移势垒和较大的分裂能, 使得它具有优异的延

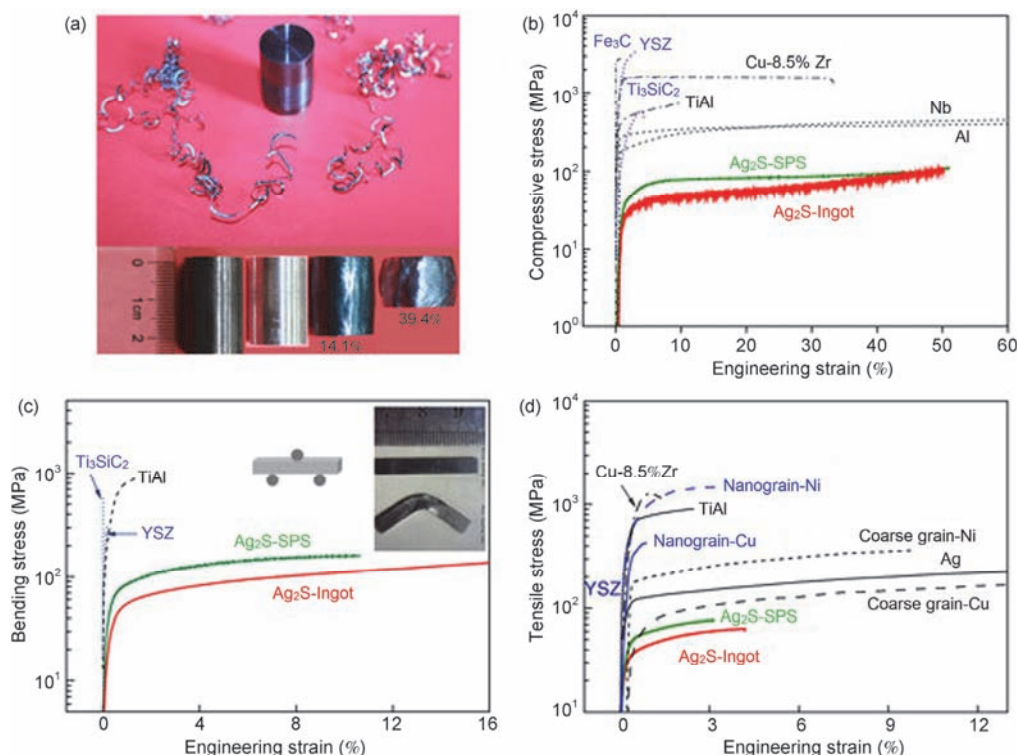


图1 (网络版彩色)无机半导体 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S材料的室温机械性能. (a) 用于压缩性能表征的 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S圆柱形块体材料及其被捶打后的形变照片.  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S的压缩应力曲线(b), 弯曲应力曲线(c)和拉伸应力曲线(d)

展性. 同时, 研究者通过对化学键的分析表明,  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S晶体结构中晶面之间存在相对较弱的原子相互作用, 在滑移的过程中, S原子始终和周围的6个Ag原子相互作用, 从而抑制了无机半导体 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S的断裂, 实现优异的可延展性.

室温可延展的 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S材料与传统的脆性半导体具有显著的差异, 其具备可折叠、可拉伸、可弯曲等优异的力学特性, 优异的力学和能带性质使得其在柔性半导体器

件领域具有巨大的应用潜力. 针对柔性电子领域的应用, Shi等人<sup>[3]</sup>亦成功制备了 $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S块体材料及薄膜材料, 发现重复弯折并不影响其电学性能.  $\alpha$ -Ag<sub>2</sub>S兼具优异的金属力学性能、可调的电性能及较高的载流子迁移率等特性, 其有望在柔性电子、光电器件、生物医药以及能源存储等诸多领域引起重大变革. 该工作亦将开启寻找和制备其他具有类金属力学性能的半导体材料的研究.

## 参考文献

- 1 Lu L, Chen X, Huang X, et al. Revealing the maximum strength in nanotwinned copper. *Science*, 2009, 323: 607–610
- 2 Schiøtz J, Tolla F D D, Jacobsen K W. Softening of nanocrystalline metals at very small grain sizes. *Nature*, 1998, 391: 561–563
- 3 Shi X, Grin Y, Chen L D, et al. Room-temperature ductile inorganic semiconductor. *Nat Mater*, 2018, 17: 421–426