

Au 纳米颗粒负载 SnO₂ 双层空心立方体的 CO 气敏性能

马俊锋¹, 曾毅²

(1. 吉林大学生命科学学院,

2. 材料科学与工程学院, 汽车材料教育部重点实验室, 长春 130012)

摘要 基于中空多孔微纳米结构的结构特点以及贵金属 Au 纳米颗粒的催化活化作用, 制备了 Au 纳米颗粒负载的 SnO₂ 双层空心立方体, 其 CO 气敏性能比纯相 SnO₂ 纳米结构显著增强. 本文对纯相和 Au 负载 SnO₂ 双层空心立方体的结构、形貌和气敏性能进行了研究, 发现均匀负载的 Au 纳米颗粒未显著破坏 SnO₂ 双层空心立方纳米结构. CO 气敏性能研究结果表明, Au 负载 SnO₂ 在最佳工作温度 (220 °C) 下对 24.7 mg/m³ (20 ppm) CO 气体的灵敏度可达 20.9, 明显高于纯相 SnO₂ 的灵敏度. Au 负载 SnO₂ 对 CO 气敏特性的显著增强不仅归因于双层空心立方结构的特殊结构优点, 还可以归因于负载的 Au 纳米颗粒的催化活化作用.

关键词 二氧化锡; 金; 多层纳米结构; 催化活化; 气体传感器

中图分类号 O614

文献标志码 A

随着科学技术的发展和人们环保意识的增强, 快速而准确地检测、监测有毒有害、可燃性及挥发性气体受到广泛关注. 20 世纪 60 年代, 研究人员发现半导体氧化物对于可燃气体具有良好的电学响应特性, 随后基于半导体氧化物的气体传感器研究获得了迅速的发展^[1]. 半导体金属氧化物对外界气氛的变化非常敏感, 以其为基础的气体传感器具有成本低廉、性能易于调制和器件结构简单等优点^[2]. 目前的研究工作主要是通过降低敏感材料的尺寸以及控制敏感材料的形貌等手段, 以暴露更多的表面活性位点参与气敏反应, 进而提高气敏性能. 从材料学角度讲, 设计合理的分级多孔结构与空心微/纳米结构来减少材料的自聚集并提高气体分子输运能力, 被认为是显著提高敏感材料气敏性能的有效手段之一. 在众多半导体氧化物中, SnO₂ 作为 n 型宽带隙半导体具有较强的分子氧吸附能力和良好的响应-恢复能力, 已成为应用潜力最大的氧化物气敏材料之一^[3,4]. 迄今, 已开发出模板法、自模板、奥斯特瓦尔德熟化和置换反应等多种空心合成策略, 并制备了不同尺寸、形貌和结构的空心多孔微纳米结构, 其展现出独特的电学特性及气敏性能^[5].

对于提高 SnO₂ 的气敏性能, 大量的研究工作集中在控制其晶相、结构、形状和尺寸, 进而调控其比表面积和气体分子的快速传输^[6-8]. 然而, 纯相 SnO₂ 气敏性能的选择性较差, 单纯提高 SnO₂ 气敏材料的比表面积对提高选择性的贡献较小. 但是, 将 SnO₂ 与贵金属或其它氧化物进行掺杂与复合得到异质纳米结构, 例如 SnO₂/Au, SnO₂/Pd, SnO₂/ZnO, SnO₂/Fe₂O₃, SnO₂/TiO₂ 等, 可进一步提高与改善其气敏性能. 这是因为掺杂与复合可调制表面能带结构, 调变待测气体的吸附活化能和气敏反应历程, 已成为提高气体选择性的一种有效途径. 近些年, 人们已经在 SnO₂ 异质纳米结构的合成及气敏性能研究方面取得了一定的进展^[9-14]. 然而, 与纯相 SnO₂ 纳米结构, 尤其是蓬勃发展的空心纳米结构研究相比, SnO₂ 异质纳米结构的合成和气敏性质的研究尚处于起步阶段, 还未形成全面而规律性的认识, 对复合异质材料尺寸的精确调控仍带有一定的经验性. 因此, 开展 SnO₂ 异质纳米结构的可控合成与气敏

收稿日期: 2018-07-06. 网络出版日期: 2018-09-07.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (批准号: 20170101168JC, 20180101271JC) 资助.

联系人简介: 曾毅, 男, 博士, 教授, 主要从事先进敏感功能材料与传感器和新能源材料等方面的研究.

E-mail: zengyi@jlu.edu.cn

研究,不但可以丰富功能纳米结构的合成新途径,还可以提升与发现新特性,从而拓展 SnO_2 基材料在环境和电子信息等领域的应用范围.

本文采用一种低成本的多步骤合成路线制备了纯相 SnO_2 和 Au 纳米颗粒均匀负载的 SnO_2 双层空心立方体(HNCs). 通过 X 射线衍射仪(XRD)、场发射扫描电子显微镜(FESEM)和透射电子显微镜(TEM)等手段,对纯相与 Au 负载的 SnO_2 双层空心立方体的结构、形貌和物性进行了表征,并对其 CO 气体敏感性能进行了研究. 结果表明, Au 纳米颗粒的负载并未显著破坏 SnO_2 的双层空心立方结构. 除了具有高比表面积、少团聚结构和许多微/中孔等特征, Au 负载 SnO_2 对 CO 气敏特性的显著增强不仅可以归因于双层空心立方结构的特殊结构优点,还可以归因于所负载的 Au 纳米颗粒的催化活化作用.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

四氯化锡($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)和硝酸(HNO_3)购自国药集团化学试剂有限公司;氯化锌(ZnCl_2)和氢氧化钠(NaOH)均购自北京化学工业集团有限责任公司. 以上试剂均为分析纯且使用前未经进一步的纯化.

Rigaku D/max 2550V/PC 型 X 射线衍射仪(XRD, 日本理学公司), Cu $K\alpha$ 射线, $\lambda = 0.15418 \text{ nm}$, 扫描范围 $20^\circ \sim 80^\circ$, 扫描速度 $4^\circ/\text{min}$; JEOL JSM-6700F 型场发射扫描电子显微镜(FESEM, 5 kV, 日本电子公司); JEOL JEM-2100F 型透射电子显微镜(TEM, 200 kV, 日本电子公司); JEOL JEM-2100F 型透射电子显微镜所带的能量散射 X 射线元素分析(EDX); JEOL JEM-2100F 型高分辨透射电子显微镜(HRTEM, 200 kV, 日本电子公司)以及选区电子衍射仪(SAED); Micromeritics ASAP 2020 型全自动快速比表面积及介孔/微孔分析仪(美国麦克公司), 氮气吸附脱附等温线采用 Brunauer-Emmett-Teller(BET)方法计算得到, 孔径分布通过等温线吸附分支采用 Barrett-Joyner-Halenda(BJH)方法计算得到.

1.2 样品的制备

SnO_2 双层空心纳米立方体的合成: 参照文献[15]方法, 先将 1 mmol ZnCl_2 和 1 mmol $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 溶于 15 mL 去离子水中, 在混合搅拌过程中, 将 25 mL 的 10 mmol NaOH 水溶液缓慢滴加到混合溶液中, 滴加完成后继续搅拌 10 min 并静置 2 h 后, 将 15 mL 浓度为 2 mol/L 的 NaOH 水溶液缓慢滴加到混合溶液中. 混合溶液静置 2 h 后, 将反应后的沉淀物离心清洗并干燥收集; 将上述样品在 850°C 空气气氛中退火 30 min, 自然冷却到室温; 然后取 50 mg 退火后的样品溶于 5 mL 浓度为 8 mol/L 的 HNO_3 溶液中, 静置 8 h 后, 将沉淀物离心清洗并烘干干燥, 收集样品, 得到双层空心 SnO_2 纳米立方体.

Au 负载的 SnO_2 HNCs 的合成: 将上述双层空心 SnO_2 纳米立方体与 1.0% (质量分数)的 HAuCl_4 混合搅拌, 随后在快速搅拌下逐滴加入 5 mL $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 到上述溶液中; 将沉淀物离心分离, 多次清洗并干燥, 于 350°C 空气气氛中退火 1 h, 自然冷却到室温, 获得最终的 Au 纳米颗粒负载的双层空心 SnO_2 纳米立方体.

1.3 气体传感器的制作及测试

基于获得的反应产物制作旁热式气体传感器. 首先将适量样品与去离子水按一定比例混合成糊状浆料, 均匀涂敷于预制有 Au 电极的陶瓷管座上, 于空气气氛下烘干备用^[16]; 将螺旋状的 Ni-Cr 合金丝插入上述陶瓷管中, 将 Au 电极的引线与 Ni-Cr 合金加热丝分别焊接在管座上的不同针脚上即构成了完整的旁热式气体传感器. 该气体传感器在空气气氛下的老化处理过程与气敏性能研究均通过 WS-60A 型气敏特性测试仪(中国炜盛电子科技有限公司)获得的. 气体传感器的灵敏度表示为 R_a/R_g , 其中 R_a 和 R_g 分别为传感器在空气气氛和测试气体气氛中的电阻值. 在某一浓度时, 传感器的气体响应时间(τ_{res})和恢复时间(τ_{recov})分别定义为传感器开始接触被测气体及开始脱离被测气体时, 初始电阻 R_a 或 R_g 到电阻变化量为 $|R_a - R_g| \times 90\%$ 时所需要的时间.

2 结果与讨论

首先对不同产物的晶体结构进行了 XRD 表征, 结果如图 1 所示. 经过对比可以发现, 未负载 Au 纳米颗粒的样品的所有 XRD 衍射峰与金红石相 SnO₂(JCPDS 标准卡, No.41-1445) 的标准衍射谱一致, 且未观察到其它杂质峰, 表明未负载样品为纯相金红石结构 SnO₂. 通过分析 Au 负载样品的特征衍射峰可以发现, Au 负载样品与未负载 Au 纳米颗粒的样品的 XRD 谱图具有相似的峰形特征. 尽管 Au 负载样品的衍射峰的峰强有所下降, 但所有明显的衍射峰仍可被指认为金红石结构 SnO₂. 没有观察到 Au 纳米颗粒的衍射峰的原因可能是 Au 负载量相对于 SnO₂ 而言较低.

对未负载样品的微观形貌和结构进行了表征分析. 由图 2(A) 可见, 未负载的纯相 SnO₂ 样品由大量的单分散颗粒组成, 这些单分散颗粒具有规则的立方体结构特征和相似的尺寸分布. 由图 2(B) 可见, 单分散的 SnO₂ 立方体的各个表面非常粗糙, 且具有多孔结构. 由表面破损的部分颗粒可知, SnO₂ 立方体内部可能是空心结构. 图 2(C) 为单个破损的 SnO₂ 颗粒的典型 FESEM 照片, 可以观察到 SnO₂ 颗粒外壳有不同程度的脱落, 但是仍保留了立方体的形状, 其内部为规则的立方状空腔, 外壳层表面非常粗糙且为多孔结构. 值得注意的是, 该典型 FESEM 照片表明 SnO₂ 立方体实际由立方状空腔与独特的双层空心结构构成. 与单层的空心立方结构相比, 这种空心双层结构因增加了额外的暴露壳体而具有更高的比表面积, 在传感器领域比单层空心结构具有更好的敏感特性. 图 2(D) 为 SnO₂ 产物的低倍率 TEM 照片, 其结果和 FESEM 表征一致, 进一步证实了 SnO₂ 产物具有空心结构和双层结构, 其内外壳层具有高度统一的多孔结构. 图 2(C) 插图为单个 SnO₂ 产物的 SAED 照片, 可以观察到典型的环状衍射花样, 说明 SnO₂ 产物为多晶结构. 图 2(D) 插图是 SnO₂ 产物的典型 HRTEM 照片, 通过分析可知, SnO₂ 立方体的壳层由大量尺寸约为 5 nm 的 SnO₂ 球形纳米粒子构成, 典型的晶格条纹间距为 0.33 nm,

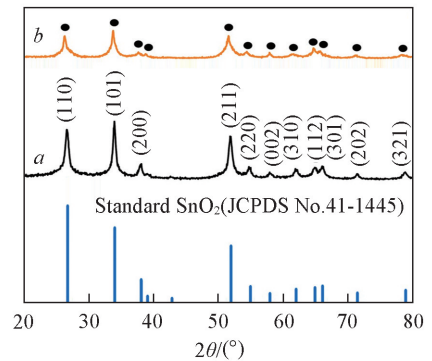


Fig.1 XRD patterns of pure SnO₂ HNCs(a) and Au-loaded SnO₂ HNCs(b)

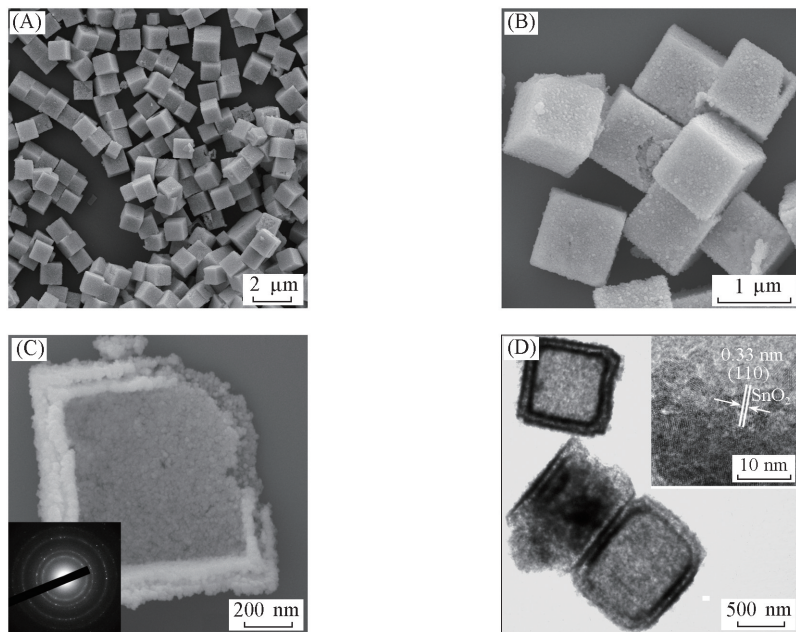


Fig.2 FESEM images(A—C) and TEM image(D) of pure SnO₂ HNCs

Insets in (C) and (D) are the typical SAED pattern and HRTEM image, respectively.

与金红石结构 SnO_2 的(110)晶面的晶面间距一致,这也表明该空心双层立方体实际是以大量 SnO_2 纳米颗粒为结构单元组装的分级纳米结构.

进一步对 Au 负载 SnO_2 样品的形貌、结构和成分进行了分析. 由图 3(A)~(C) 所示 FESEM 和 TEM 照片可知, Au 负载 SnO_2 样品与未负载样品的形貌、结构相似. 这表明 Au 负载及随后的退火处理并未明显破坏以 SnO_2 纳米颗粒为结构单元的双层空心立方结构. 图 3(D) 插图是 Au 负载 SnO_2 破损壳层的 HRTEM 照片. 可见, Au 纳米颗粒的负载并未明显改变 SnO_2 壳层具有的多孔微结构. 进一步放大倍率观察, 如图 3(D) 所示, 可以分辨出纳米颗粒存在晶格间距不同的 2 种典型晶格条纹, 分别为 0.23 和 0.33 nm. 这 2 种典型的晶格条纹分别对应于 Au(111) 晶面和 SnO_2 (110) 晶面的晶面间距, 从而证明了 Au 纳米颗粒在 SnO_2 壳层上的负载.

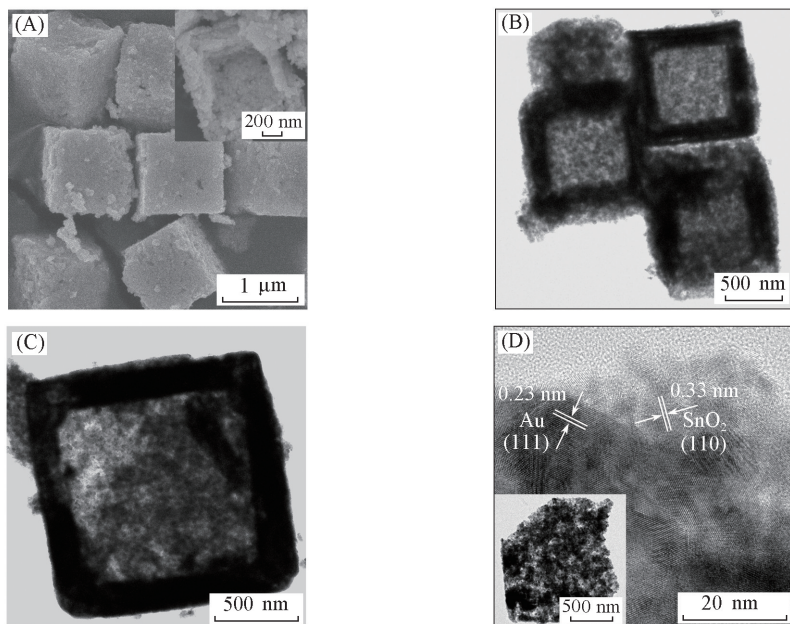


Fig.3 Typical FESEM(A), TEM(B, C) and HRTEM(D) images of Au-loaded SnO_2 HNCs

Insets are the enlarged FESEM(A) and TEM(D) images of Au-loaded SnO_2 HNCs.

对 Au 负载前后的样品进行了 EDX 能谱分析, 结果如图 4(A) 所示. 在谱图中可以观察到 C 和 Cu 元素的存在, 这主要是因为测试样品均需要分散到附有 C 支持膜的 Cu 网表面以便于进行测试. 除了 Sn 和 O 元素谱线来自于 SnO_2 样品之外, Au 元素也可在负载后的 SnO_2 样品中被检测到. 图 4(B) 为未负载和 Au 负载 SnO_2 样品的氮气等温吸附/脱附曲线和孔径分布图. 通过 BET 法计算可得纯相 SnO_2 产

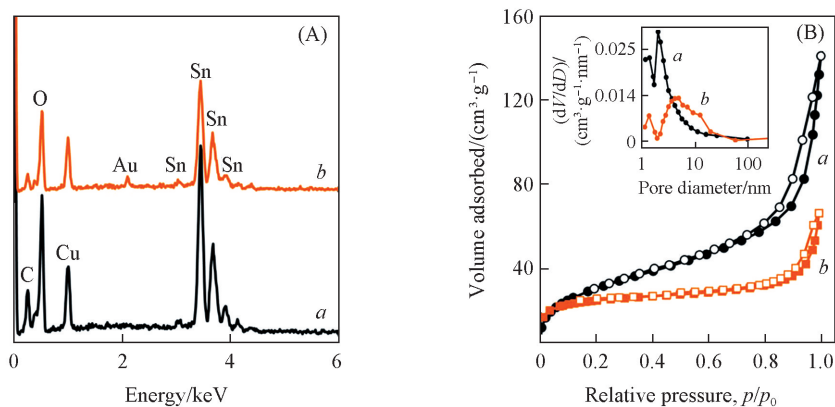


Fig.4 EDX(A) and nitrogen adsorption/desorption isotherms with pore-size distribution(B) of pure and Au-loaded SnO_2 HNCs

a. Unloaded SnO_2 ; *b.* Au-loaded SnO_2 .

物的比表面积为 110.9 m²/g, 通过 SnO₂ 产物的等温线吸附分支和 BJH 方法计算得出 SnO₂ 产物的平均孔径大小为 9.4 nm, 其中最高几率孔径分布在 2.1 nm, 表明纯相 SnO₂ 产物的双层结构具有大孔和介孔特性. 在气敏测试的气体吸附和脱附过程中, 大孔和介孔结构可以为测试气体分子的快速吸/脱附提供大量的扩散通道. 而 Au 负载后的 SnO₂ 产物的比表面积为 85.1 m²/g, 比纯相 SnO₂ 产物的比表面积略有降低; 其相应的平均孔径大小为 14.3 nm, 其中最高几率孔径分布在 4.6 nm. 其平均孔径及最高几率孔径分布比纯相 SnO₂ 产物的平均孔径及最高几率孔径分布更大. 这可能是因为 Au 纳米颗粒负载在 SnO₂ 产物表层时产生了不规则的微孔. 比表面积和孔径分析结果表明, Au 纳米颗粒在 SnO₂ 表面的分散负载未明显破坏 SnO₂ 的双层空心结构和多孔结构.

基于双层空心立方结构具有的独特结构优势, 例如规则的内部空腔及易渗透的双层多孔壳层, Au 纳米颗粒均匀负载的 SnO₂ 样品维持了高比表面积的活性表面和合理的多孔体系, 有利于气体分子在立方体结构内、外、层间之间快速传输的同时完成快速吸附和脱附过程. 此外, Au 的催化活化作用还可进一步提升 SnO₂ 的气敏性能. 因此, 我们分别基于未负载和 Au 负载 SnO₂ 样品制作了气体传感器, 针对有毒和易燃的一氧化碳气体 (CO) 敏感特性进行了研究. 由于气体传感器的工作温度对气敏性能有显著影响, 首先考察了 2 种 SnO₂ 气体传感器对 24.7 mg/m³ (20 ppm) CO 气体的响应灵敏度与工作温度之间的关系, 结果如图 5(A) 所示. 可见, 未负载和 Au 负载后的 SnO₂ 传感器对 CO 气体的灵敏度均随着工作温度逐渐增加而呈现出类似的抛物线形状. 这种变化可以由气体分子吸附/脱附过程之间的动态平衡进行解释^[17]. 具体地, 纯相 SnO₂ 传感器对 CO 气体的灵敏度随着工作温度增加而逐渐增大; 当工作温度为 300 °C 时其灵敏度达到最大值 5.1; 进一步提高工作温度, 其灵敏度逐渐下降. 相比于未负载的 SnO₂ 传感器, Au 负载 SnO₂ 传感器在其相应的工作温度范围内表现出明显增加的响应灵敏度. 当工作温度 220 °C 时, Au 负载 SnO₂ 传感器对 24.7 mg/m³ (20 ppm) CO 气体的灵敏度最大值提高到约 20.9. 与未负载的 SnO₂ 传感器相比, Au 负载 SnO₂ 气体传感器对相同浓度 CO 气体的灵敏度的显著增强可能是由于贵金属 Au 对气敏过程的催化活化作用所致.

研究了未负载和 Au 负载 SnO₂ 气体传感器对 CO 气体的选择性, 结果如图 5(B) 所示. 结果表明, Au 负载 SnO₂ 气体传感器对 24.7 mg/m³ (20 ppm) CO 气体的灵敏度高达 20.9, 而对于相同浓度的其它气体的灵敏度不超过 6. 这表明 Au 负载 SnO₂ 对 CO 气体具有良好的选择性. 与 Au 负载 SnO₂ 传感器相比, 未负载的 SnO₂ 气体传感器对 CO 气体的选择性较差, 甚至对 CO 气体的灵敏度还要低于其它干扰气体. 因此, Au 纳米颗粒的负载显著提高了 SnO₂ 空心立方结构对 CO 气体的选择性. 未负载和 Au 负载 SnO₂ 气体传感器对 CO 气体的浓度与灵敏度关系如图 5(C) 所示. 结果表明, 未负载和 Au 负载 SnO₂ 传感器对 CO 气体的灵敏度均随着气体浓度的升高而增加, 然后增速逐渐变缓, 最终在浓度约 247 mg/m³ (200 ppm) 时接近饱和, 但是 Au 负载 SnO₂ 气敏材料的灵敏度增速明显高于未负载 Au 的纯相 SnO₂. 进一步考察了较低浓度范围 (0.617~12.3 mg/m³, 即 0.5~10 ppm) 内 2 种 SnO₂ 气体传感器对 CO 气体的灵敏度与 CO 气体浓度之间的关系, 如图 5(D) 所示. 结果表明, Au 负载 SnO₂ 传感器在该浓度区间内具有更好的线性关系及最低可检测浓度 [0.617 mg/m³ (0.5 ppm)], 在最低检测浓度时的灵敏度约为 1.1. 对于未负载 SnO₂ 传感器而言, 其对 CO 气体的最低可探测浓度为 2.47 mg/m³ (2 ppm), 灵敏度为 1.16. 上述研究结果表明, Au 的催化活化作用可以显著提高浓度与灵敏度之间的线性关系并提升对 CO 气体的检测极限. 进一步对 Au 负载 SnO₂ 样品对 CO 气体的响应和恢复时间进行了研究, 结果如图 5(E) 和 (F) 所示. 可见, Au 负载 SnO₂ 传感器对不同浓度 CO 气体 (1.23, 2.47, 6.17, 12.3 与 24.7 mg/m³, 即 1, 2, 5, 10 与 20 ppm) 的多个连续动态响应/恢复测试证明了其对 CO 气体具有快速的响应和恢复能力, 以及良好的重复性和稳定性. Au 负载 SnO₂ 传感器对 24.7 mg/m³ (20 ppm) CO 气体的响应时间 (τ_{res}) 和恢复时间 (τ_{recov}) 分别约为 0.7 和 3.8 s. 与文献 [9~11] 中报道的 SnO₂ 对 CO 气体的气敏性能比较, Au 负载的 SnO₂ 双层空心立方结构对 CO 气体具有更好的灵敏度及更快的响应-恢复速度.

未负载和 Au 负载的 SnO₂ 空心立方结构的气体敏感机制可以通过空间电荷模型来解释^[18]. 具体

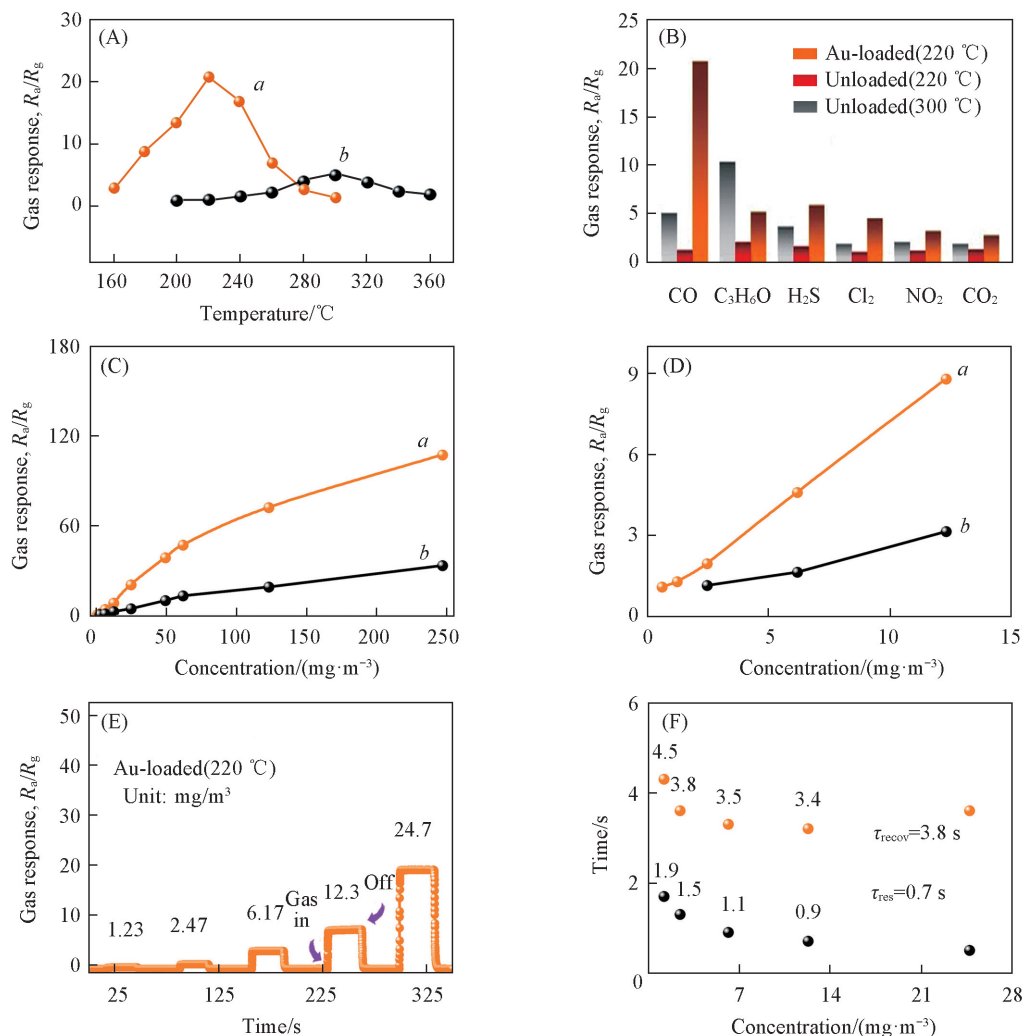


Fig.5 Temperature-dependent response and selectivity curves (A, B), concentration-dependent response (C, D) of pure and Au-loaded SnO₂ HNCs, dynamic response transients and the response-recovery time of Au-loaded SnO₂ HNCs (E, F)

(A) a. Au-loaded SnO₂; b. pure SnO₂; (C, D) a. Au-loaded (220 °C); b. unloaded (300 °C).

地, 由于 SnO₂ 的电子亲合势较氧气低, 当其暴露在空气气氛中时, 其表面物理吸附的 O₂ 分子可以从导带捕获载流子 (自由电子) 形成化学吸附的氧离子 (O₂⁻, O⁻ 或 O²⁻)。这一过程由于自由电子浓度的减少而导致 SnO₂ 样品的电阻增加。当吸附过程达到一定平衡后, SnO₂ 表面上形成较厚电子耗尽层, 从而获得稳定的高电阻态。这时将 SnO₂ 置于还原性气氛中, 例如 CO 气氛, 在合适的温度范围内, SnO₂ 材料表面化学吸附的氧离子 (O₂⁻, O⁻ 或 O²⁻) 将与 CO 分子发生氧化还原反应, 如图 6 所示。该气敏反应过程会释放出电子并转移给 SnO₂ 样品。随着气敏反应的进行, SnO₂ 样品的自由电子浓度将会逐渐增加而获得稳定的低阻态。重复这一过程即可在 SnO₂ 的电学特性与被测气体之间建立起相应的气敏性能关系。

对于 Au 负载 SnO₂ 双层空心立方结构来说, 其 CO 气敏性能的显著提升主要有 2 个方面的原因。首先, SnO₂ 双层空心立方体是以大量 SnO₂ 纳米颗粒为结构单元组装成的分级纳米结构, 壳层结构具有疏松多孔的结构特点, 而 Au 负载的 SnO₂ 并未明显破坏这种结构。较高的比表面积和空心多孔结构有利于气体分子快速传输到敏感材料表面, 这在相当程度上保证了 SnO₂ 具有较高的反应灵敏度和快速的响应-恢复速率。其次, 基于 Au 的催化活化作用^[17]。由于 Au 的电子逸出功比 SnO₂ 的逸出功更高, 当 Au 纳米颗粒均匀分散在 SnO₂ 表面时, SnO₂ 材料的自由电子将会转移到 Au 纳米颗粒, 导致在 SnO₂-Au 界面处产生额外的能带弯曲。此外, 溢出效应可以将吸附在 Au 纳米颗粒表面的 O₂/CO 分子外溢到

SnO₂表面, 并活化 CO 分子和氧离子之间的气敏反应^[9], 最终提升了 SnO₂的气敏性能。

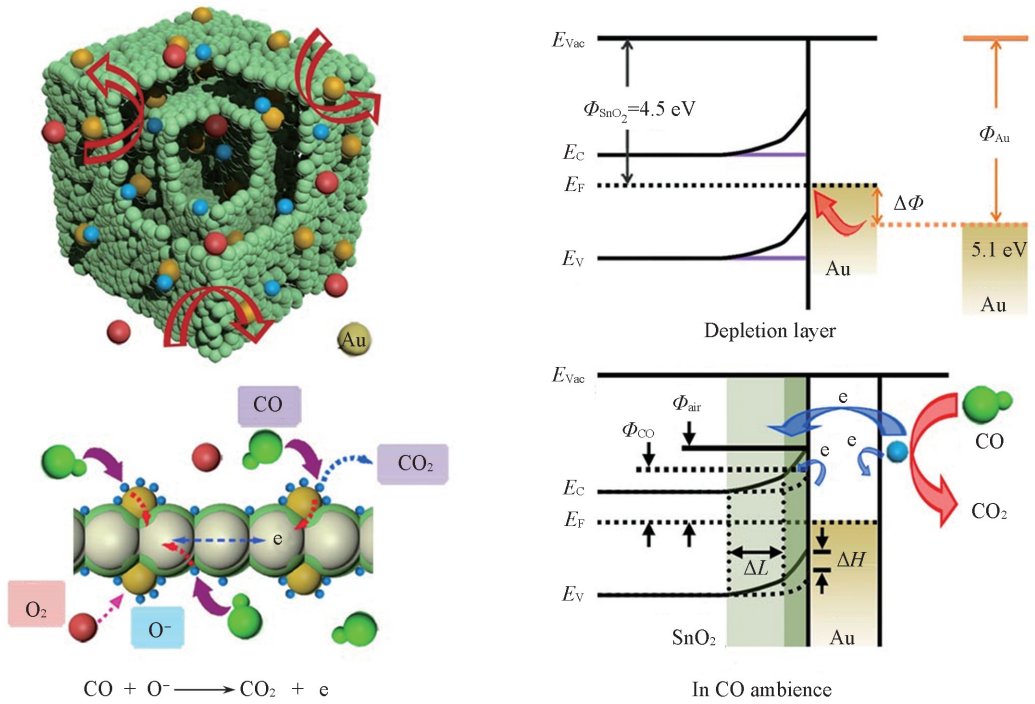


Fig.6 Schematic diagram of CO sensing process and mechanism of Au-loaded SnO₂ HNCs

3 结 论

采用一种低成本的多步骤合成路线制备了 Au 纳米颗粒均匀负载的 SnO₂ 双层空心立方结构, 该结构是以大量 SnO₂ 纳米颗粒为结构单元组装成的分级纳米结构, 壳层结构具有疏松多孔的结构特点, 而 Au 负载的 SnO₂ 未明显破坏此结构. Au 负载 SnO₂ 对 CO 气敏特性的显著增强不仅可以归因于双层空心立方结构具有的高比表面积、多孔易渗透性等优点, 还可归因于负载的 Au 纳米颗粒对 SnO₂ 气敏过程的催化活化作用。

参 考 文 献

- [1] Scott R., Yang S. M., Chabanis G., Coombs N., Williams D. E., Ozin G. A., *Adv. Mater.*, **2001**, *13*, 1468—1472
- [2] Zeng Y., Zhang T., Qiao L., *Mater. Lett.*, **2009**, *63*, 843—846
- [3] Yamazoe N., Fuchigami J., Kishikawa M., Seiyama T., *Surf. Sci.*, **1979**, *86*, 335—344
- [4] Park I. J., Park S., Kim D. H., Jeong H., Lee S., *Mater. Lett.*, **2017**, *202*, 48—51
- [5] Lee J. H., *Sens. Actuat. B*, **2009**, *140*, 319—336
- [6] Xu C. N., Tamaki J., Miura N., Yamazoe N., *Sens. Actuat. B*, **1991**, *3*, 147—155
- [7] Qin L., Xu J., Dong X., Pan Q., Cheng Z., Xiang Q., Li F., *Nanotechnology*, **2008**, *19*, 185705
- [8] Wang Y. L., Jiang X. C., Xia Y. N., *J. Am. Chem. Soc.*, **2003**, *125*, 16171—16176
- [9] Bing Y. F., Zeng Y., Feng S. R., Qiao L., Wang Y. Z., Zheng W. T., *Sens. Actuat. B*, **2016**, *227*, 362—372
- [10] Katoch A., Byun J. H., Choi S. W., Kim S. S., *Sens. Actuat. B*, **2014**, *202*, 38—45
- [11] Durrani S. M., Al-Kuhaili M. F., Bakhtiari I. A., Haider M. B., *Sensors*, **2012**, *12*, 2598—2609
- [12] Omran A. A. H., Hussian S. K., *Mater. Lett.*, **2015**, *155*, 109—113
- [13] Guo X., Guo H., Ma Z., Ma C., Ding J., Yuan N., *Mater. Lett.*, **2018**, *222*, 142—145
- [14] Liu L., Song P., Wei Q., Zhong X., Yang Z. X., Wang Q., *Mater. Lett.*, **2017**, *201*, 211—215
- [15] Bing Y. F., Zeng Y., Liu C., Qiao L., Zheng W. T., *Nanoscale*, **2015**, *7*, 3276—3284
- [16] Zeng Y., Zhang T., Wang L., Kang M., Fan H., Wang R., He Y., *Sens. Actuat. B*, **2009**, *140*, 73—78
- [17] Della P. C., Falletta E., Prati L., Rossi M., *Chem. Soc. Rev.*, **2008**, *37*, 2077—2095
- [18] Egashira M., Shimizu Y., Takao Y., Sako S., *Sens. Actuat. B*, **1996**, *35*, 62—67

Significant Improvement of CO Sensing Performance Based on Au-sensitized Double-shelled SnO₂ Hollow Nanocubes[†]

MA Junfeng¹, ZENG Yi^{2*}

(1. College of Life Sciences, 2. College of Materials Science and Engineering,
Key Laboratory of Automobile Materials of Ministry of Educations, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract Based on the unique structural merits of hollow interior, hierarchical nanoparticle-assembled and permeable double shells, the CO sensing performance of double-shelled SnO₂ nanocubes can be further promoted by the sensitization of the loaded Au nanoparticles. The crystallinity, morphology and structure of pure and Au-loaded SnO₂ hollow nanocubes (HNCs) are detailedly characterized and the results certify that the less-agglomerated configuration of Au-loaded SnO₂ is still reserved. Furthermore, the CO sensing performances of pure and Au-loaded SnO₂ HNCs demonstrate that Au-loaded SnO₂ exhibits a high response value of 20.9 to 24.7 mg/m³ (20 ppm) CO at the optimal working temperature of 220 °C, which is significantly higher than that of pure SnO₂. Besides their structural merits, the significant improvement of CO sensing properties can be attributed to the sensitized promotion of noble Au.

Keywords Tin oxide; Au; Multilayered nanostructures; Catalytic activation; Gas sensor

(Ed.: F, K)

[†] Supported by the Science and Technology Development Project of Jilin Province, China (Nos. 20170101168JC, 20180101271JC).

欢迎订阅《Chemical Research in Chinese Universities》



《Chemical Research in Chinese Universities》(CRCU, 高等学校化学研究, 英文版, 双月刊)创刊于1984年,是中华人民共和国教育部委托吉林大学主办的英文版化学学科综合性学术刊物,为SCI收录期刊,2013年影响因子1.119。

《CRCU》聘请了87位学术造诣精深的国内外知名化学家组成学术阵容强大的编委会,其中中国科学院院士37位。主编为中国科学院院士、高分子化学家周其凤教授。

《CRCU》栏目包括研究论文、研究快报和综合评述。以“新、快、高”(即选题内容新,文章发表速度快和学术水平及编辑出版质量高)为办刊特色,集中报道我国高等院校和中国科学院各研究所在化学学科及其交叉学科、新兴学科、边缘学科等领域开展的基础研究、应用研究和重大开发研究所取得的最新成果。

《CRCU》从2013年第29卷第1期起,与国际著名出版商Springer公司开展合作出版工作。纸版刊物的海外发行由Springer独家代理,电子版纳入SpringerLink网络平台。欢迎广大化学工作者踊跃投稿,并给予关注和支持。

《CRCU》采用在线投稿,网上审稿,胶版印刷,编排规范,装帧质量高。国内定价90元/期(540元/年),国际刊号ISSN 1005-9040,国内刊号CN 22-1183/06,邮发代号12-170。国内读者可在当地邮局订阅。

欢迎投稿! 欢迎订阅!

通讯地址:长春市高新区前进大街2699号吉林大学前卫南区《高等学校化学学报》编辑部; 邮政编码:130012

联系电话:0431-88499216; 传真:0431-88499216; E-mail: cjcu@jlu.edu.cn; http://www.cjcu.jlu.edu.cn