

片状 CdGa_2O_4 纳米材料的制备及其甲醛气敏性能

焦 成¹, 蒋余芳¹, 文会荣¹, 储向峰¹, 梁士明²

(1. 安徽工业大学 化学与化工学院, 安徽 马鞍山 243032)

(2. 临沂大学 材料科学与工程学院, 山东 临沂 276005)

摘 要: 采用微波-煅烧法制备了 CdGa_2O_4 纳米片, 利用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X 射线光电子能谱(XPS)等手段对所制备的 CdGa_2O_4 纳米片进行了表征。研究了 CdGa_2O_4 的 pH 值对 CdGa_2O_4 纳米片气敏性能的影响。结果表明: 溶液 pH 值为 10 时制备的前驱体沉淀经煅烧所得片状 CdGa_2O_4 在 110 °C 时对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度为 316.4; 对 0.0001 $\mu\text{L/L}$ 的甲醛灵敏度为 2.0。

关键词: CdGa_2O_4 ; 气敏性能; 微波-煅烧法; 甲醛

中图分类号: TB381

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)09-3335-07

甲醛(HCHO)是一种无色且具有刺激性味道的气体。2014 年, 世界卫生组织把甲醛归类为第 1 组人类致癌物, 规定室内甲醛最高浓度不得超过 0.1 $\mu\text{L/L}$ ^[1], 同年欧盟委员会将甲醛归类为 1B 致癌物和诱变剂^[2-4]。人长时间处于甲醛浓度大于 15 $\mu\text{L/L}$ 的气氛环境中可能会有生命危险^[5]; 处于 0.5~3.0 $\mu\text{L/L}$ 的甲醛气氛环境中, 人体的呼吸系统会受到严重损害^[5]。因此, 检测低浓度的甲醛是具有现实意义的。目前, 检测甲醛的手段有气相色谱法、荧光探针法^[6]和试纸法^[7]等, 然而这些方法存在着检测仪器体积大、操作复杂以及检测成本高等不足, 半导体气体传感器在检测 VOCs (挥发性有机化合物) 时因具有检测成本低、灵敏度高以及操作方便等优点进入研究者的视野^[8-11]。

目前有关甲醛气敏传感器的研究受到了研究者的广泛关注, 但已报道的甲醛气敏传感器存在工作温度高, 对甲醛的灵敏度低, 最低检测限过高等不足。如 Zhu 等人^[12]通过水热法制备了核桃形 BiFeO_3 微球, 该材料制备的气敏传感器在工作温度为 240 °C 时对 500 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度为 8.20, Velusamy 等人^[13]利用化学喷雾热解法制备了 Co-CdO 薄膜, Co-CdO 材料制备的气敏传感器在工作温度为 130 °C 时对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度为 0.86。Wang 等^[14]利用溶液-煅烧法制备了 Cr_2O_3 -ZnO 分级异质结构材料, Cr_2O_3 -ZnO 材料制备的气敏传感器在工作温度为 200 °C 时对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度为 2.25。近些年来, 尖晶石型金属氧化物 (AB_2O_4) 由于组成的多样性, 物理化学性质

可控等特点, 被广泛应用于气体传感领域。与传统的 n 型半导体 ZnO、 In_2O_3 和 SnO_2 相比, 尖晶石型金属氧化物 CdGa_2O_4 的功函数相对较小更易失去电子且带隙宽度大小 (3.8 eV) 适中, 被视为很有潜力的气敏材料^[15]。

本研究利用微波-煅烧法制备了 CdGa_2O_4 纳米片, 并研究了前驱体沉淀 pH (pH=8, 9, 10, 11) 对制备的 CdGa_2O_4 纳米片气敏性能的影响。结果表明, 溶液 pH 值为 10 时制备的 CdGa_2O_4 材料在 110 °C 时对甲醛的灵敏度达到 316.4, 且对甲醛具有灵敏度高、检测限低等优点。

1 实 验

$\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (国药集团化学试剂有限公司, AR); $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (上海麦克林生化科技有限公司, AR); NaOH(国药集团化学试剂有限公司, AR); 乙醇(国药集团化学试剂有限公司, AR); 去离子水(实验室自制)。

称取 0.836 g $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和 0.309 g $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 溶于装有 20 mL 去离子水的烧杯中搅拌均匀, 用 3 mol L^{-1} 的 NaOH 溶液调节混合液的 pH 值分别至 8、9、10 和 11, 再将上述混合液搅拌 2 h 后转移至微波反应罐内, 180 °C 保温 2 h。所得产物分别用去离子水和乙醇洗涤 3 次, 转移至 80 °C 烘箱中干燥 12 h, 研磨均匀。将所得粉体置于马弗炉中(升温速率 1 °C min^{-1})700 °C 热处理 5 h, 冷却至室温后研磨均匀即得产物 CdGa_2O_4 粉体。将前驱体沉淀 pH 值为

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61971003, 61671019)

作者简介: 焦 成, 男, 1996 年生, 硕士生, 安徽工业大学化学与化工学院, 安徽 马鞍山 243032, E-mail: 1933834635@qq.com

8、9、10 和 11 所制备的 CdGa_2O_4 粉体分别标记为 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO。

将适量 CdGa_2O_4 粉体置于研钵，滴入 1~2 滴松节油透醇，充分研磨混合均匀后，用小毛刷将其均匀涂抹在 Al_2O_3 管的外壁上，用 Ni-Cr 丝穿过 Al_2O_3 管，最后将 Al_2O_3 管焊接在基座上。通过调节加热丝两端功率控制工作温度。灵敏度^[16]定义为：

$$S_{(\text{Sensitivity})} = R_a / R_g \quad (1)$$

式中， R_a 为气敏材料在空气中的稳定电阻， R_g 是气敏材料在被测气体中的稳定电阻，测试时实验室环境中空气湿度与所测气体的相对湿度保持在 60% 左右。响应时间是当元件在空气中达到稳定阻值后，将其放入待测气体中阻值达到总变化量的 90% 所用的时间；恢复时间是元件在被测气体中稳定后再放入气体中时，电阻恢复到电阻变化量 90% 所用的时间。

2 结果与讨论

2.1 CdGa_2O_4 的物相组成、结构形貌、元素组成及比表面分析

图 1 是 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料的 XRD 图谱。制备的 CdGa_2O_4 材料在 2θ 为 29.355° 、 34.604° 、 36.205° 、 42.029° 、 52.100° 、 55.549° 、 60.941° 、 69.055° 、 71.967° 、 72.868° 有明显的衍射峰且分别对应于 CdGa_2O_4 的 (220)、(331)、(222)、(400)、(422)、(521)、(440)、(620)、(533) 和 (622) 晶面。10CGO 样品的 XRD 图谱与 CdGa_2O_4 标准衍射卡 (PDF No.20-0863) 一致，且 XRD 主要衍射峰较窄，说明材料结晶程度较好^[17]。当前驱体沉淀 pH=8 时，只含有 CdGa_2O_4 峰无其它杂峰；前驱体沉淀 pH=9, 10, 11 时，XRD 图谱出现了 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 峰， $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 可能是热处理时间或温度不够， $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 分解不完全残留的。当前驱体沉淀 pH 值从 8 增加到 10 时， CdGa_2O_4 各衍射峰的强度随着 pH 的增

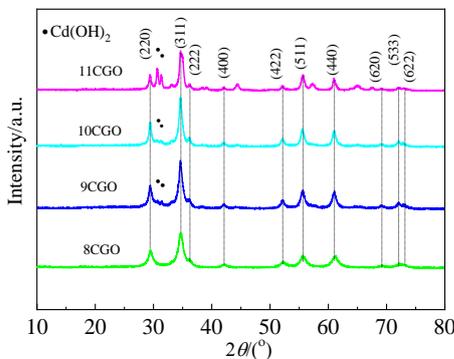


图 1 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of 8CGO、9CGO、10CGO and 11CGO materials

大而增大，说明 OH 浓度的增加可能促进了晶粒的增长^[18]，使 CdGa_2O_4 的结晶度更好。根据谢乐公式计算得出，pH=8, 9, 10, 11 时平均晶粒尺寸分别为 11、14、15、13 nm。

图 2a、2b、2c、2d 分别为 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 纳米材料的 SEM 照片。由图 2a 表明 8CGO 样品中只含有少量的纳米片，且纳米片表面堆积了大量的不规则颗粒。在图 2b~2d 中 9CGO、10CGO 和 11CGO 的形貌均为纳米片状结构，这些随机取向的纳米片相互连接且分散均匀。在 SEM 照片中测量纳米片尺寸得到 CdGa_2O_4 样品的粒子尺寸分布统计图。根据图 2e 计算出 4 种样品的平均粒子尺寸分别为 176、460、298、458 nm。

图 3 是前驱体沉淀 pH=10 时制备的 CdGa_2O_4 纳米材料的 TEM 照片、HRTEM 照片和 EDS 能谱及 EDS 元素面扫描。从图 3a 可以看出 CdGa_2O_4 纳米片由平均尺寸约为 500 nm 的六方片组成。根据图 3b 的 HRTEM 照片可知，0.304 和 0.259 nm 的晶格条纹间距分别对应

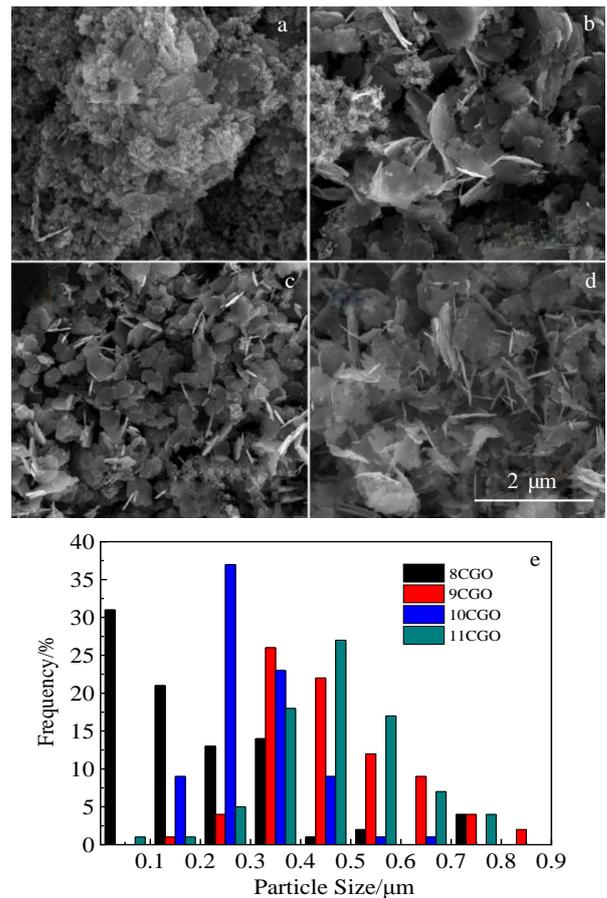


图 2 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料的 SEM 照片及粒子尺寸分布图

Fig.2 SEM images (a~d) and particle size distribution (e) of 8CGO (a), 9CGO (b), 10CGO (c) and 11CGO (d) materials

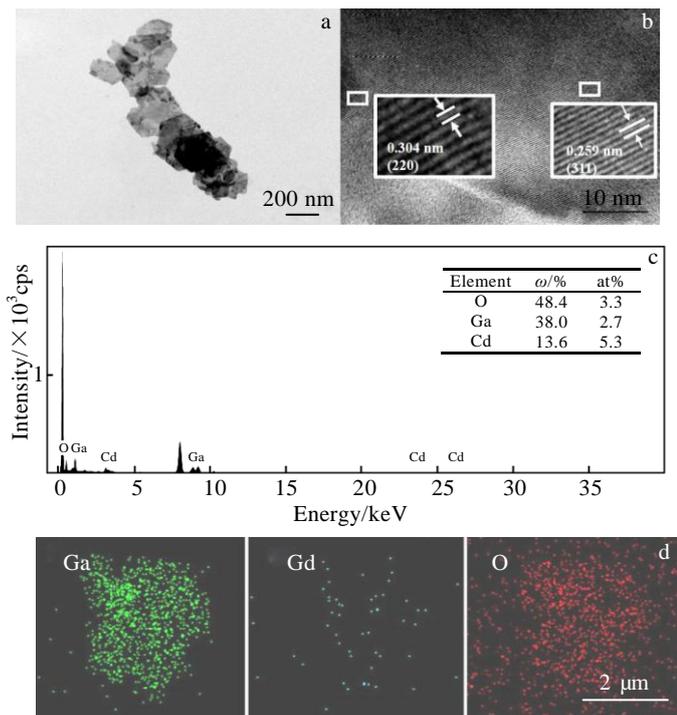


图 3 10CGO 材料的 TEM、HRTEM 照片及 EDS 能谱和 EDS 元素面扫描

Fig.3 TEM image (a), HRTEM image (b), EDS analysis result (c) and EDS element mapping (d) of 10CGO materials

CdGa₂O₄ 的(220)和(311)晶面^[15]。从图 3c 可以看出 CdGa₂O₄ 纳米片由 Cd、Ga 和 O 元素组成且分布均匀, 且 Cd 元素占 13.6%, Ga 元素占 38.0%, O 元素占 48.4%(质量分数)。

金属氧化物半导体材料的带隙能的大小在一定程度上会影响半导体材料气敏性能的优劣。图 4a 和 4b 分别是 CdGa₂O₄ 纳米材料的紫外可见吸收光谱及对应的带隙宽度。根据公式 $ahv=(ahv-E_g)^{1/2}$, 利用 $(ahv)^2$ 对 $h\nu$ 作图(图 4b), 曲线最大斜率处的切线与坐标轴的交点横坐标即为带隙宽度^[19]。由图 4b 可知, 溶液 pH

值分别为 8、9、10、11 时制备的 CdGa₂O₄ 材料对应的带隙大小为 3.0、2.8、2.3、2.4 eV, 说明前驱体 pH 可能会影响 CdGa₂O₄ 材料的带隙能大小, 从而影响 CdGa₂O₄ 材料的气敏性能。

图 5 是 10CGO 材料的 N₂ 吸附-脱附等温线和孔径分布图。图 5a 判断该曲线属于的 IV 型, H3 滞后环, 表明材料中存在介孔^[20-23]。使用 Barrett-Joyner-Halenda (BJH)模型根据解吸数据计算出的孔径分布在 23.8 nm。表 1 中 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料的比表面积分别为 63.94、36.56、24.73、24.02 m²/g, CdGa₂O₄ 纳米片的比表面积随着 pH 值的增大而减小。

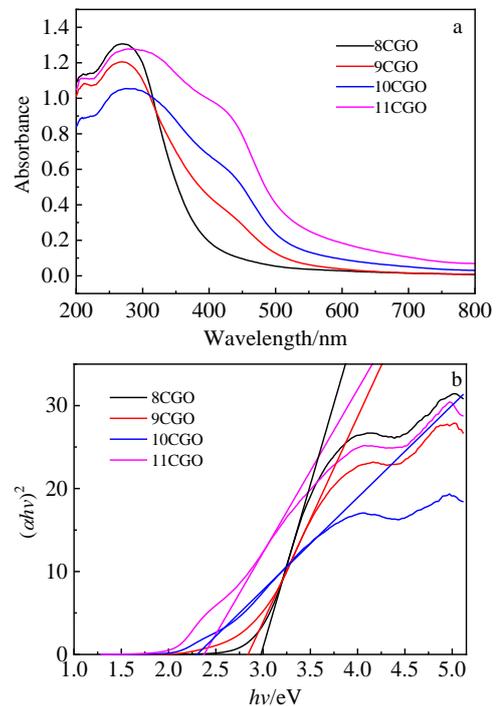


图 4 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料的紫外可见吸收光谱和禁带宽度

Fig.4 UV-Vis absorption spectra (a) and band gap width (b) of 8CGO, 9CGO, 10CGO and 11CGO materials

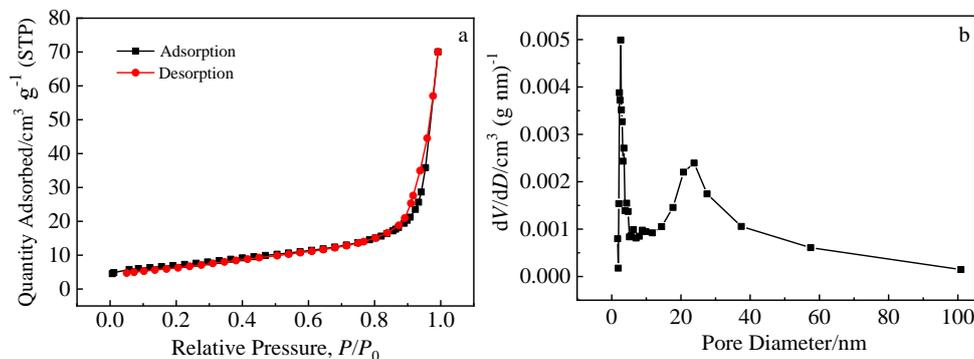


图 5 10CGO 材料的 N₂ 吸附-脱附等温线和孔径分布图

Fig.5 N₂ adsorption-desorption isotherm (a) and pore diameter distribution (b) of 10CGO material

表 1 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料的比表面积

Table 1 Specific surface area of 8CGO, 9CGO, 10CGO and 11CGO materials

Material	8CGO	9CGO	10CGO	11CGO
Specific surface area/ m^2g^{-1}	63.94	36.56	24.73	24.02

图 6a 是 CdGa_2O_4 的 XPS 全谱图。图 6b 是 Cd 3d 图谱。可见, Cd $3d_{5/2}$ 和 Cd $3d_{3/2}$ 分别位于 404.38 和 411.21 eV, 能量位置差为 6.83 eV, 为 Cd^{2+} 的特征峰^[24]。图 6c 是 Ga 2p 的特征峰, 图中 Ga $2p_{1/2}$ 和 Ga $2p_{3/2}$ 分

别位于 1117.36 和 1144.30 eV, 说明 Ga 2p 分处于 2 个不同位点, 代表 Ga-O 键与氧空位的键合^[25], 且能量差为 26.94 eV, 与文献^[26]报道的 26.84 eV 近似一致。图 6d 为 O 1s 拟合成 3 个特征峰, 其中位于 529.80 eV 的峰归因于 CdGa_2O_4 表面的晶格氧 O^{2-} ^[27]、530.20 eV 处的峰是氧空位 O^- 、531.10 eV 位置的峰与吸附氧 O^{2-} 有关^[28]。

2.2 CdGa_2O_4 纳米片的气敏性能

图 7 是 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料制备的气敏元件在不同工作温度下(80~400 °C)对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度曲线。从图中可以看出, 在工作温

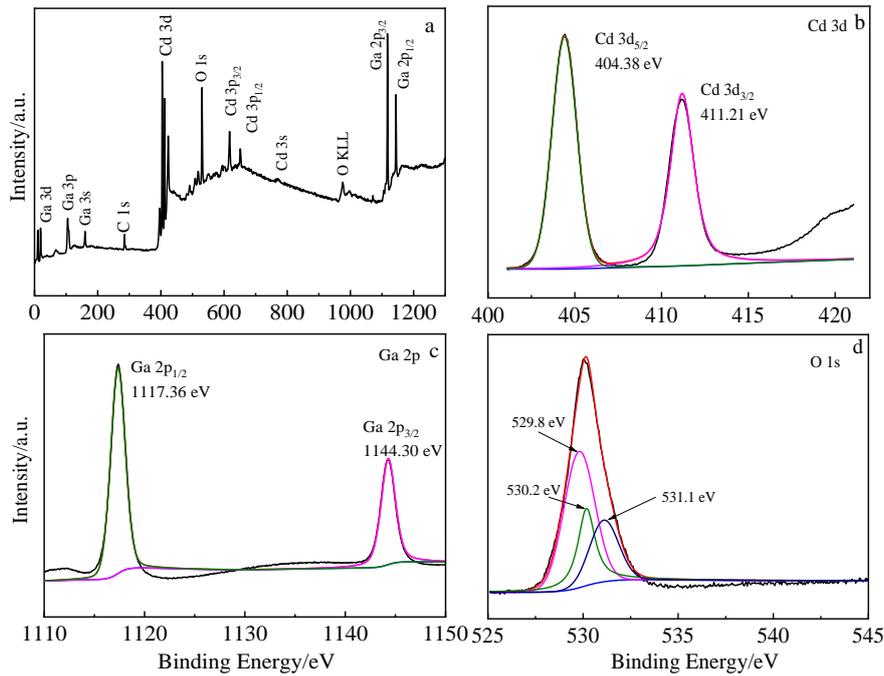


图 6 10CGO 材料的 XPS 图谱

Fig.6 XPS spectra of 10CGO material: (a) full spectrum, (b) Cd 3d, (c) Ga 2p, and (d) O 1s

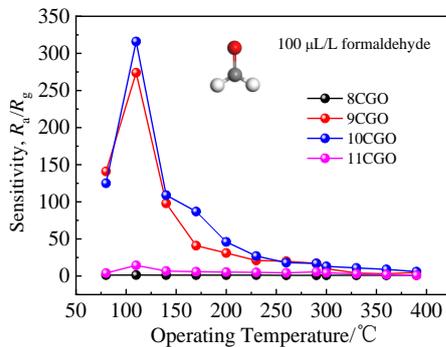


图 7 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料制备的元件在 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛中的灵敏度随工作温度的变化曲线

Fig.7 Variation of sensitivity of gas sensor prepared by 8CGO, 9CGO, 10CGO and 11CGO materials in 100 $\mu\text{L/L}$ formaldehyde with the operating temperature

度大于 110 °C 时, 基于 CdGa_2O_4 纳米片制成的传感器对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度随着工作温度的升高而降低。这可能与甲醛在纳米片表面上的物理吸附有关, 随着温度的升高, CdGa_2O_4 表面上吸附的甲醛减少^[28], 因此传感器对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度降低。在图 7 中, 当工作温度为 110 °C 时, 9CGO 和 10CGO 制备的元件对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度明显高于 8CGO 和 11CGO 制备的元件, 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料制备的元件在工作温度为 110 °C 时对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的灵敏度分别为 1.3、274.0、316.4、14.3。说明溶液 pH 值不同时制备的 CdGa_2O_4 纳米片对 100 $\mu\text{L/L}$ 甲醛的气敏性能有较大差异。

图 8 是 10CGO 材料制备的气敏元件对 100 $\mu\text{L/L}$ 的 7 种气体灵敏度随工作温度的变化曲线。从图中可

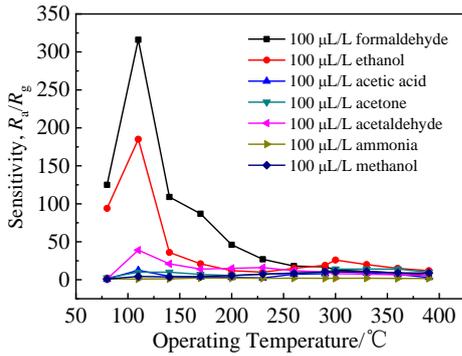


图 8 10CGO 材料制备的气敏元件对 100 μL/L 7 种气体的灵敏度与工作温度的关系

Fig.8 Variation of sensitivity of the gas sensor prepared by 10CGO material to 100 μL/L seven gases with the operating temperature

以明显看出元件对甲醛的灵敏度明显高于其它气体。图中 10CGO 材料制备的元件在工作温度为 110 °C 时对 100 μL/L 甲醛、乙醇、乙酸、丙酮、乙醛、氨气、甲醇的灵敏度分别为 316.4、185.0、12.5、10.0、39.0、1.0、4.3，以上结果表明 10CGO 材料制备的元件对甲醛表现出比较高的灵敏度。

图 9 是 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料制备的气敏元件在最佳工作温度 110 °C 下对不同浓度甲醛(100 μL/L~0.0001 μL/L)的灵敏度随时间的变化曲线，所有元件的灵敏度都随着甲醛浓度的降低而减小。10CGO 样品制备的气敏元件对 100、10、1、0.1、0.01、0001、0.0001 μL/L 甲醛的灵敏度分别为 316.4、272.5、50.6、44.4、12.0、13.5、2.0。8CGO 材料和 11CGO 材料制备的气敏元件对甲醛几乎无响应，9CGO 和 10CGO 材料制备的气敏元件对甲醛的最低检出限都是 0.0001 μL/L。

图 10 是 10CGO 制备的气敏元件在 110 °C 不同浓度甲醛中的电阻随时间的变化曲线。由图 10 可知，甲醛的浓度越大，响应时间越短，而恢复时间则相反。该气敏元件对 1000、100、10、1 μL/L 甲醛的响应时间分别为 3.0、5.4、275.0、330.0 s。

图 11 是 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料制备的气敏元件在工作温度为 110 °C 时对 100 μL/L 甲醛、乙醇、乙酸、丙酮、乙醛、氨气和甲醇等 7 种气体的灵敏度柱状图。从图 11 中可以看出 10CGO 材料制备的气敏元件对 100 μL/L 甲醛的灵敏度高于其余 6 种气体，而且 9CGO 和 10CGO 材料制备的气敏元件与 8CGO 和 11CGO 材料制备的气敏元件对于 100 μL/L 的甲醛的灵敏度相比有明显差异。

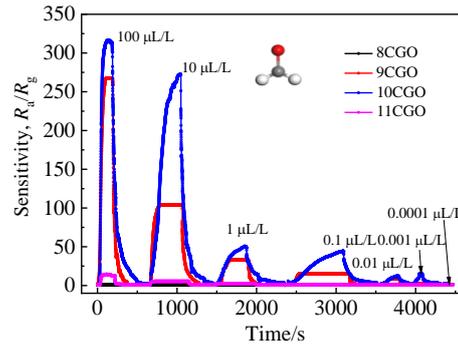


图 9 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料制备的气敏元件对不同浓度甲醛的灵敏度随时间的变化曲线

Fig.9 Variation of sensitivity of 8CGO, 9CGO, 10CGO and 11CGO materials gas sensor to different concentrations of formaldehyde with time

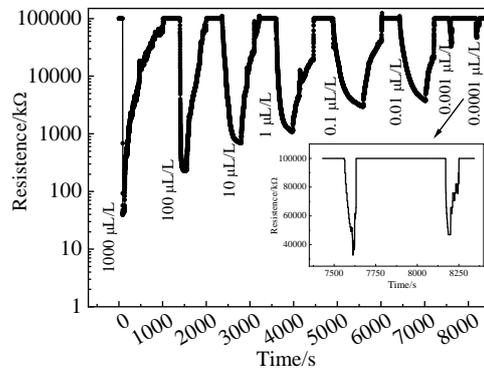


图 10 10CGO 材料制备的气敏元件在不同浓度甲醛中的电阻随时间的变化曲线

Fig.10 Variation of resistances of the gas-sensor prepared by 10CGO material to different concentrations of formaldehyde with time

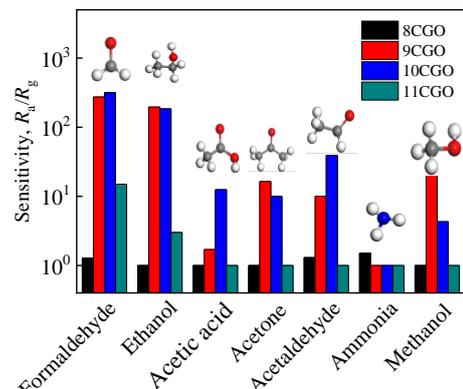


图 11 8CGO、9CGO、10CGO 和 11CGO 材料制备的气敏元件在 110 °C 对 100 μL/L 7 种气体的灵敏度

Fig.11 Sensitivity of the gas sensor prepared by 8 CGO, 9 CGO, 10CGO and 11 CGO materials to 100 μL/L seven gases at 110 °C

图 12 是 10CGO 材料制备的气敏元件在 110 °C 对 100 μL/L 甲醛的灵敏度随湿度的变化关系, 当测试环境相对湿度为 20%~30% 时, 气敏元件对 100 μL/L 甲醛的灵敏度为 40.0 左右; 当相对湿度提高到 40% 时, 气敏元件对 100 μL/L 甲醛的灵敏度增加到了 120.0; 当相对湿度提高到 60%~80% 时, 气敏元件对 100 μL/L 甲醛的灵敏度进一步增强, 达到 300.0。说明 10CGO 材料对 100 μL/L 甲醛的灵敏度随湿度的增加而增大, 湿度对元件灵敏度的影响较大, 这是因为随着测试环境相对湿度的增加, 气敏材料表面会吸附更多水分子, 吸附的水分子与材料表面的电子相互作用, 从而释放更多的电子到气敏材料的导带中, 进一步改变材料的电阻, 影响材料的灵敏度^[29]。

图 13 是 10CGO 材料制备的气敏元件在 110 °C 对 100 μL/L 甲醛的灵敏度随时间的变化关系。从图中可以看出, 10CGO 材料制备的气敏元件对 100 μL/L 甲

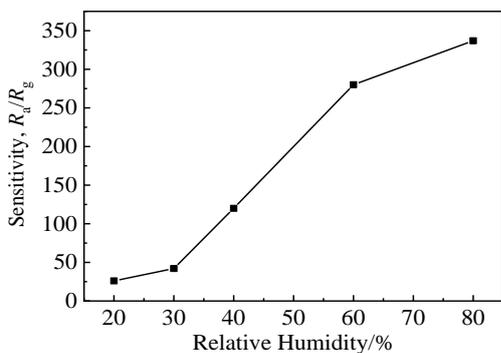


图 12 10CGO 制备的气敏元件对甲醛的灵敏度随湿度的变化关系

Fig.12 Variation of sensitivity of the 10CGO gas sensor to formaldehyde with humidity

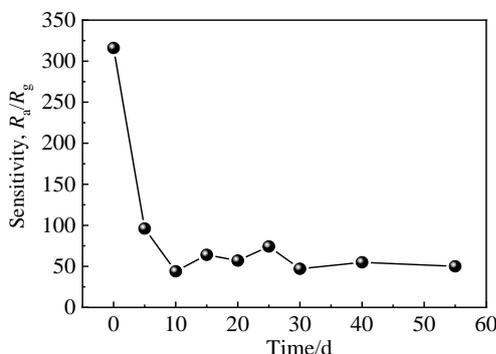


图 13 10CGO 材料制备的气敏元件在 110 °C 对 100 μL/L 甲醛的灵敏度随时间的变化

Fig.13 Variation of sensitivity of the 10CGO gas sensor to 100 μL/L formaldehyde at 110 °C with time

醛的灵敏度在第 1 天到第 5 天时间段内由最初值 317.0 降至 96.0; 在第 5 天至第 10 天时间段内灵敏度图继续保持下降状态, 至第 10 天降至 44.0; 从第 10 天至第 60 天时间段内, 其对 100 μL/L 甲醛的灵敏度几乎稳定在 50.0。说明该 CdGa₂O₄ 材料的甲醛气敏稳定性有待进一步改进。

2.3 片状 CdGa₂O₄ 纳米材料的气敏机理

CdGa₂O₄ 的甲醛气敏机理可以归因于甲醛分子与材料表面吸附氧之间的反应, 引起电阻的变化产生可以被检测到的电信号^[30]。氧气可以在室温下物理吸附在 CdGa₂O₄ 纳米片的表面上, 捕获来自 CdGa₂O₄ 纳米片导带的电子以形成氧负离子 O₂⁻。一旦接触 HCHO, O₂⁻ 就会与 HCHO 分子反应生成 H₂O 和 CO₂ 分子, 同时释放电子到 CdGa₂O₄ 纳米片的导带上, 材料的电阻因此发生了变化, 从而产生了可以被检测到的信号变化^[31]。气敏反应方程式如下, 气敏反应机理见图 14。

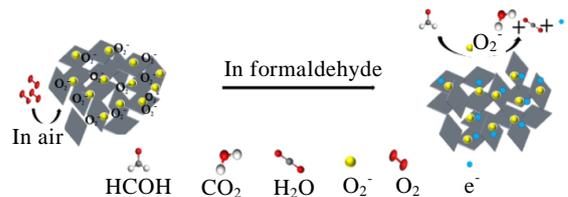
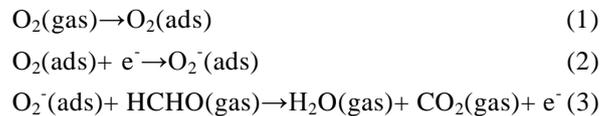


图 14 传感机制示意图

Fig.14 Schematic diagram of sensing mechanism

3 结 论

1) 采用微波-煅烧法制备出了片状 CdGa₂O₄ 纳米材料, 溶液的 pH 值对材料的形成及其气敏性能有较大影响。当制备过程中前驱体沉淀 pH=10 时, 对甲醛的灵敏度最高, 对 100 μL/L 甲醛灵敏度为 316.4, 最小检测限达到 0.0001 μL/L, 100 μL/L 和 10 μL/L 甲醇的响应时间分别为 5.4 和 275.0 s。

2) 微波-煅烧法制备的片状 CdGa₂O₄ 纳米材料是一种有潜力的甲醛气敏传感材料之一。

参考文献 References

[1] Laciste M T, Luna M D G, Tolosa N C *et al. Chemosphere*[J], 2020, 246: 125 763
 [2] Hadei M, Hopke P K, Rafei M *et al. Environ Sci Pollut R*[J], 2018, 25: 27 423

- [3] Wang M L, Xu S M, Li S Y *et al.* *J Ind Eng Chem*[J], 2019, 75: 224
- [4] Hussain S, Aslam N, Yang X *et al.* *Ceram Int*[J], 2018, 44: 19624
- [5] Wei C Z, Liu K F, Tao J *et al.* *Chemistry-An Asian Journal*[J], 2018, 13: 111
- [6] Xu Z Q, Chen J H, Hu L L *et al.* *Chinese Chem Lett*[J], 2017, 28: 1935
- [7] Zhang J, Li X, Zhang J C *et al.* *Chem Eng J*[J], 2020, 382: 122 779
- [8] Zappa D, Galstyan V, Kaur N *et al.* *Anal Chim Acta*[J], 2018, 1039: 1
- [9] Guo Xueyuan(郭雪原), Zhan Qingran(詹青燃), Jin Guixin(金贵新) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(11): 3010
- [10] Kim H J, Lee J H. *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2014, 192: 607
- [11] Xiao Jingkun(肖井坤), Song Chengwen(宋成文), Dong Wei(董伟) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(5): 1241
- [12] Zhu K M, Ma S Y, Pei S T *et al.* *Mater Lett*[J], 2019, 246: 107
- [13] Velusamy P, Babu R R, Ramamurthi K *et al.* *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2018, 255: 871
- [14] Wang T Y, Liu B B, Li Q J *et al.* *Mater Lett*[J], 2018, 221: 260
- [15] Chen H, Sun L, Li G D *et al.* *Chem Mater*[J], 2018, 30: 2018
- [16] Li Xue(李学), Zhang Jun(张俊), Chu Xiangfeng(储向峰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(9): 2815
- [17] Shen Y B, Li T T, Zhong X X *et al.* *Vacuum*[J], 2020, 172: 109 036
- [18] Iranmanesh P, Yazdi S T, Mehran M *et al.* *J Magn Magn Mater*[J], 2017, 449: 172
- [19] Kamarulzaman N, Aziz N D A, Kasim M F *et al.* *J Solid State Chem*[J], 2019, 277: 271
- [20] Chen H, Li G D, Fan M H *et al.* *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2017, 240: 689
- [21] Lin Q Q, Li Y, Yang M J. *Sens Actuators B: Chem*[J], 2012, 173: 139
- [22] Wang M J, Hou T Y, Shen Z R *et al.* *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2019, 291: 171
- [23] Bechambi O, Touati A, Sayadi S *et al.* *Mat Sci Semicon Proc*[J], 2015, 39: 807
- [24] Motlak M, Hamza A M, Hamed M G *et al.* *Mater Lett*[J], 2019, 246: 206
- [25] Liu D, Mo X P, Li K X *et al.* *J Power Sources*[J], 2017, 359: 355
- [26] Zardkhoshou M A, Davarani S. *J Alloy Compd*[J], 2019, 773: 527
- [27] Huang X Y, Chi Z T, Liu J *et al.* *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2020, 304: 12 730
- [28] Liu D, Tang Z L, Zhang Z T. *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2020, 303: 127 114
- [29] Yu S G, Zhang, H Y, Chen C *et al.* *Sensors and Actuators B: Chemical*[J], 2019, 287: 526
- [30] Fu X X, Yang P Y, Xiao X F *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2019, 797: 666
- [31] Zhao C H, Lan W Z, Gong H M *et al.* *Ceram Int*[J], 2018, 44: 2856

Preparation of Flake CdGa₂O₄ Nanomaterials and Their Formaldehyde Gas-sensitive Properties

Jiao Cheng¹, Jiang Yufang¹, Wen Huirong¹, Chu Xiangfeng¹, Liang Shiming²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Linyi University, Linyi 276005, China)

Abstract: CdGa₂O₄ nanosheets were prepared by microwave-calcination method. CdGa₂O₄ nanosheets were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The effect of pH on the gas-sensing performance of CdGa₂O₄ nanosheets was investigated. The results show that the sensitivity of CdGa₂O₄ prepared by annealing at 700 °C for 5 h after precipitation at pH of 10 to 100 μL/L formaldehyde is 316.4 at 110 °C. The sensitivity of the gas sensor based on CdGa₂O₄ nanosheets to 0.0001 μL/L formaldehyde is 2.0.

Key words: CdGa₂O₄; gas-sensing properties; microwave-calcining process; formaldehyde

Corresponding author: Chu Xiangfeng, Ph. D., Professor, School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, P. R. China, E-mail: maschem@sohu.com