

MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃复合材料的制备及传感特性研究

邓炜锋

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2025年4月27日; 录用日期: 2025年6月25日; 发布日期: 2025年7月4日

摘要

近年来, 以金属氧化物半导体为原材料制作成的气体传感器拥有体积小、功耗低、性价比高、制造工艺简单和操作简便等优点, 被广泛应用于各种气体环境中, 其中三氧化钼(MoO_3)作为一种常见的氧化物半导体材料, 在气体传感领域有着广泛的应用前景, 尤其在环境中有害气体监测、工业生产安全和医疗诊断等领域展现出巨大潜力。然而, 纯 MoO_3 气体传感器因其工作温度高、选择性差以及易受湿度影响等缺点阻碍了其进一步应用。这些阻碍也同样是金属氧化物半导体材料长期以来所面临的挑战因此为了解决这些挑战, 同时也为了能够合成出具有优异气体传感特性的材料, 本课题进行了以下研究: 本文采用简单的水热法, 将二维材料MXene成功引入到Ni掺杂的 MoO_3 纳米带中, 制备出了MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃复合材料。此外, 还研究了添加不同质量比的MXene (0%, 2.5%, 5%, 10%)对复合材料传感性能的影响。值得注意的是, MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃复合材料在100 ppm正丁醇浓度下表现出卓越的性能, 具有工作温度低(180℃)、响应高(10.21)、选择性优异等特点。此外, 这些传感器还表现出优异的抗湿性、可重复性和长期稳定性, 其性能可保持40天。最后, 对Ni掺杂的 MoO_3 纳米带和MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃复合材料进行气敏机理的探讨和分析, 并阐述Ni掺杂 MoO_3 和引入二维材料MXene后材料各自对于提高气敏性能所起到的作用。

关键词

气体传感器, MXene, Ni掺杂, 纳米带结构, 二维材料

Preparation and Sensing Characteristics Study of MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃ Composites

Weifeng Deng

School of Physical Science & Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Apr. 27th, 2025; accepted: Jun. 25th, 2025; published: Jul. 4th, 2025

文章引用: 邓炜锋. MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃ 复合材料的制备及传感特性研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(4): 604-614. DOI: 10.12677/jsta.2025.134059

Abstract

In recent years, gas sensors made of metal oxide semiconductors have been widely used in various gas environments due to their small size, low power consumption, high cost-effectiveness, simple manufacturing process and easy operation, etc. Among them, molybdenum trioxide (MoO_3), as a common oxide semiconductor material, has broad application prospects in the field of gas sensing, especially in the monitoring of environmentally hazardous gases, industrial production safety, and medical diagnostics. However, the drawbacks of pure MoO_3 gas sensors, such as high operating temperature, poor selectivity and susceptibility to humidity, hinder their further application. These obstacles are also the challenges that metal-oxide-semiconductor materials have long faced. Therefore, in order to solve these challenges and to synthesize materials with excellent gas sensing properties, the following research was carried out in this project: MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni- MoO_3 composites were prepared by introducing 2D material MXene into Ni-doped MoO_3 nanobelt using a simple hydrothermal method. In addition, the effects of MXene with different mass ratios (0%, 2.5%, 5%, 10%) on the sensing properties of the composites were also studied. It is worth noting that MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni- MoO_3 composite exhibits excellent performance at 100 ppm n-butanol concentration, with low operating temperature (180°C), high response (10.21), and excellent selectivity. In addition, the sensors demonstrate excellent moisture resistance, repeatability and long-term stability, with performance lasting up to 40 days. Finally, the gas-sensitive mechanism of Ni-doped MoO_3 nanobelt and MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni- MoO_3 composites was discussed and analyzed, and the effects of Ni-doped MoO_3 and MXene on the gas-sensitive properties were described.

Keywords

Gas Sensor, MXene, Ni Doping, Nanobelt Structure, 2D Material

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着工业化进程的快速发展,能够精确检测多种危险气体的传感器应用得越来越广泛,尤其在环境保护、工业安全、军事与航天领域、公共健康及食品安全等多个方面都变得愈加重要[1]。在现今的气体传感技术中,化学电阻式传感器拥有较为优异的传感性能,同时具备低成本、稳定的工作特性以及易于实现小型化集成等优势而广泛受到关注[2][3]。这种传感器的工作原理是将气体的种类和浓度转换为可检测的电信号[4]。金属氧化物半导体(MOS)材料是化学电阻式传感器中常用的传感材料之一, MoO_3 作为一种典型的n型半导体,具有3.2 eV的宽禁带,且具有独特的层状结构和丰富的价态,使其在气敏检测和电池制造等领域具有巨大的发展潜力。层状结构的纳米材料通常具有较大的比表面积和更多的活性位点,有助于提高气体分子的吸附和反应效率,与传统的纳米线或纳米颗粒相比,复杂形貌的材料通常能提供更多的气体传输通道,促进气体的扩散过程[5]。考虑到这一原理,通过共价掺杂调节载流子浓度被认为是一种有效提高气敏性能的方法。对于气体传感器而言,Ni已被用于提升传感材料对多种气体(如醇类气体、TMA等)的选择性和灵敏度,MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)材料对氨气、丙酮和二氧化碳等主要目标气体具有室温气敏特性,使其在室温气体传感应用中大有可为[6]-[8]。

在本文中,通过水热法成功合成了MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni- MoO_3 (MNM)复合材料,并评估了其气敏性

能。此外,还研究了添加不同质量比(2.5%、5%、7.5%和 10%)的 MXene 对复合材料传感性能的影响。值得关注的是,5%-MNM 传感器在 100 ppm 正丁醇浓度下表现出卓越的性能,具有工作温度低(180℃)、响应高(10.21)、选择性好等特点。最后,分析了 MNM 复合材料的传感机理。

2. 实验部分

2.1. Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带传感器的制备工艺

通过简单的水热法合成带状结构的 MoO₃ 纳米材料,其具体过程如图 1 所示为:将 1.2 g 二水合钼酸钠(Na₂MoO₄·2H₂O)和 0.072 g 硝酸镍(Ni(NO₃)₂)溶于 60 mL 去离子水中,再依次加入 1 g 柠檬酸(C₆H₈O₇)和 1.4 g 硫脲(CS(NH₂)₂),混合物在室温下用磁力搅拌器搅拌 60 分钟,使得混合物充分溶解在去离子水中。随后,向溶液中加入 10 mL 硝酸溶液,继续搅拌 10 分钟后倒入 100 mL 聚四氟乙烯反应釜中,放入烘箱中,保持 180℃ 反应 22 小时。收集充分水热反应的产物后,反复洗涤并干燥,再在 400℃ 的空气环境中连续煅烧 3 h,以确保产物充分氧化。经过研磨,最终得到浅灰色 Ni 掺杂的 MoO₃ 纳米带粉末。

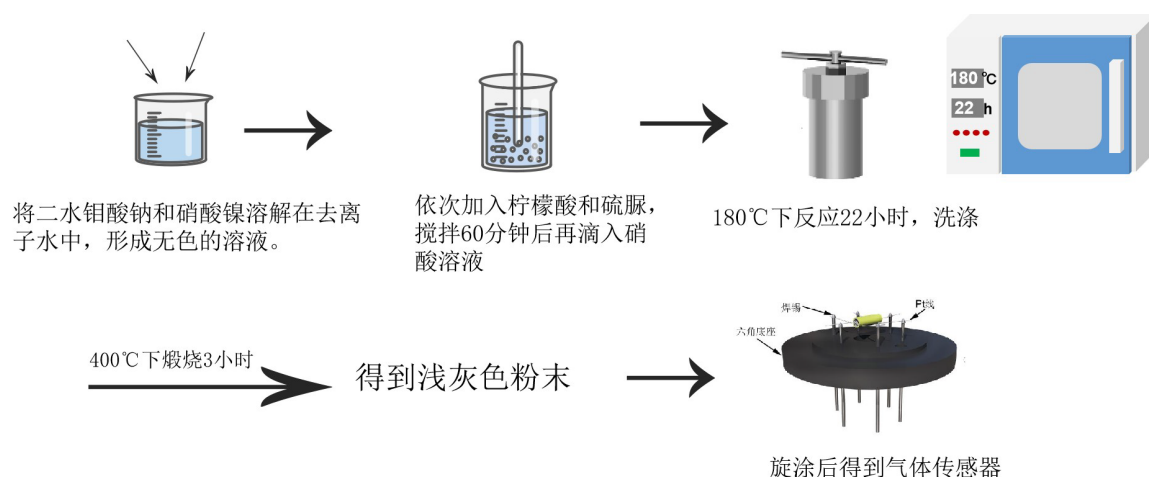


Figure 1. Schematic diagram of Ni-doped MoO₃ nanobelt
图 1. Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带示意图

2.2. MXene (Ti₃C₂T_x)/Ni-MoO₃ 传感器的制备工艺

(1) 单层 MXene 纳米片的制备

将已称量好的 3.2 g LiF 和已量取好的 40 mL 9 M 盐酸加入到反应釜中,在 40℃ 条件下搅拌 15 min,使其能够充分反应。随后,将 2 g Ti₃AlC₂ 少量多次加入到反应釜中,并搅拌 48 h。反应结束后,将产物以 3500 r/min 的转速形成沉淀,再用一定浓度的稀盐酸与去离子水洗涤多次,直至上层清液 pH 为 6。将剩余的沉淀物继续离心,当观察到上层清液变为黑色,并且底部黑色沉淀出现膨胀时,此时单层 MXene 以胶体的形式存在于上层清液中。接下来对其进行超声剥离操作,该过程中需要充入惰性气体进行保护以防止 MXene 氧化,同时需要时刻注意超声设备内温度以便于及时添冰降温。超声完成后对产物再次离心,离心后的上层液体即为单层 MXene 分散液。

(2) MXene (Ti₃C₂T_x)/Ni-MoO₃ 复合材料的制备

称取一定量的 Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带材料,用磁力搅拌器将其与 30 mL 去离子水混合搅拌 1 h,再缓慢加入超声后的单层 MXene 分散液,在室温下继续搅拌 1 h。搅拌完成后,将混合物转移到 50 mL 的水热反应釜中,在 120℃ 下的烘箱里水热 8 h。将反应釜取出,待温度冷却至室温后,离心沉淀物并用去离

子水洗涤数次,然后在冻干机中冻干保存,最终得到 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃ 复合材料,命名为 MNM。为了研究不同含量的 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)对气敏性能的影响,制备了四组复合材料,分别添加了质量比为 2.5%、5%、7.5%和 10%的单层 MXene 分散液,称为 MNM-2.5、MNM-5、MNM-7.5 和 MNM-10。

3. MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃ 复合材料的表征与分析

3.1. XRD 分析

利用 XRD 技术研究了 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)、Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带和 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃ 复合材料的物相和结构特征。单层 MXene 纳米片、Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带和 4 组 MNM 复合材料的 XRD 光谱如图 2 所示。不同掺杂比例 of MNM 复合材料的 XRD 图谱与 MoO₃ 标准卡(JCPDS 35-0609)高度一致,其中 12.78°、23.34°、25.70°和 27.34°的角度(2 θ)分别对应于 α -MoO₃ 的(020)、(110)、(040)和(021)晶面。从图中可以看出,除了 MoO₃ 和 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)的特征峰之外,没有任何其他杂峰,这表明 MNM 复合材料的制备是成功的。

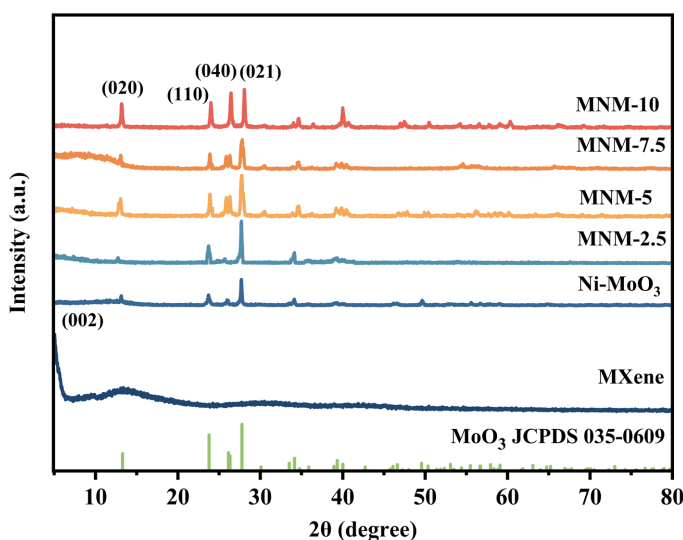


Figure 2. XRD images of MXene, Ni-doped MoO₃ nanobelt and MNM with different doping ratios

图 2. MXene、Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带和不同掺杂比例 of MNM 的 XRD 图像

3.2. SEM 分析

图 3(a), 图 3(b)显示了单层 MXene 纳米片的扫描电镜图像,从图中可以看到单层 MXene 厚度较薄,呈二维片状结构,其长度和宽度可达数十微米,MXene 表面比较粗糙,是刻蚀环境导致的。如图 3(c),图 3(d)所示,Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带材料的带状结构非常明显,每根纳米带大概 100 纳米宽,并且呈现堆叠状,这个形貌可能为气敏性能带来良好的影响。图 3(e),图 3(f)展示了单层 MXene 纳米片与 Ni 掺杂 MoO₃ 纳米带紧密包覆结合的形貌,在水热的过程中,单层 MXene 由于剪切力作用,被击碎成更小尺寸,这更有助于材料间的复合,形成理想的复合结构。

此外,如图 4 所示,对 MNM-5 样品进行了 mapping 图谱测试。从图中我们可以发现 MNM-5 样品中,Mo 元素、O 元素和 Ti 元素在样品材料中分布均匀,这也证实了本文所使用的水热法可以很好地将 MXene 材料复合到 MoO₃ 纳米带上。

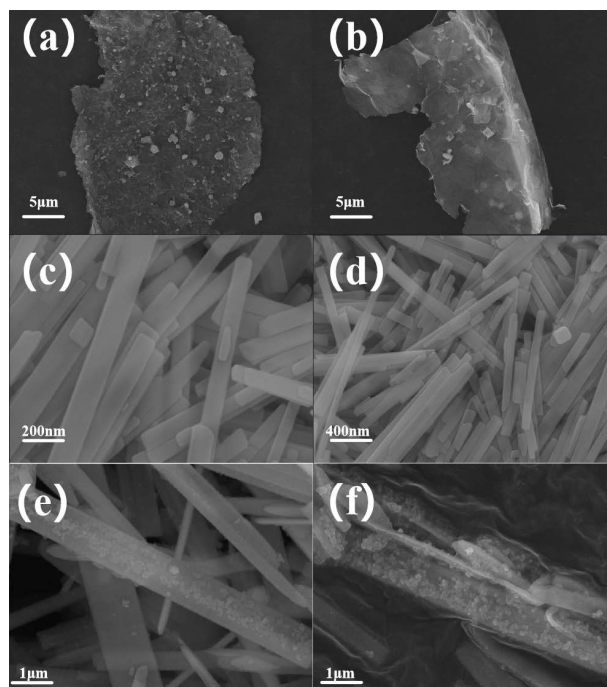


Figure 3. ((a) (b)) Monolayer MXene nanosheets; ((c) (d)) Ni-doped MoO_3 nanoribbons; ((e) (f)) MNM-5 composites

图 3. ((a) (b)) 单层 MXene 纳米片; ((c) (d)) Ni 掺杂 MoO_3 纳米带; ((e) (f)) MNM-5 复合材料

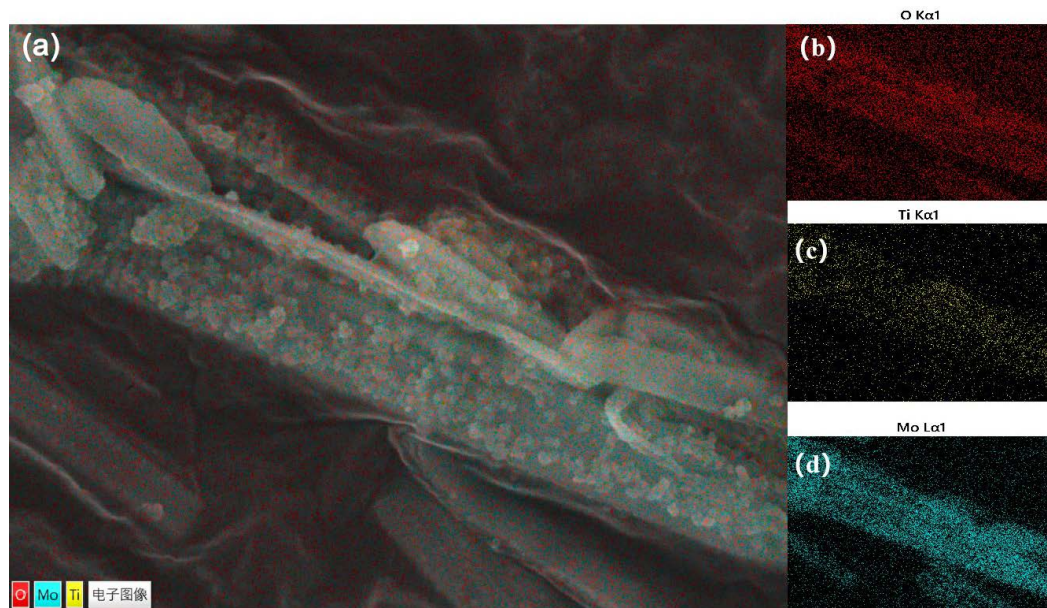


Figure 4. (a) The Mapping images of the MNM-5 sample; ((b) (d)) Mapping results of element O, element Ti and element Mo respectively

图 4. (a) MNM-5 样品的 Mapping 图像; ((b) (d)) 分别为元素 O、元素 Ti、元素 Mo 的 Mapping 结果

3.3. FTIR 分析

如图 5 所示, 在 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) 的光谱中, 618 cm^{-1} 处的峰值主要是 Ti-O 键的伸缩振动, 而其他较

大峰值的出现则是由于测试样品保存在乙醇溶液中，样品中存在乙醇溶剂干扰了测试结果。对于 MNM-5 复合材料，在 1100 cm^{-1} 处观察到了明显的峰谷，这是由于 $\text{Mo}=\text{O}$ 键的伸缩振动引起的。此外，还在 873 cm^{-1} 处观察到与 $\text{C}-\text{O}$ 键相对应的峰值，与 MXene 的 $\text{C}-\text{O}$ 键相对应。以上这些结果表明，通过上述的制备方法可以成功地合成 MNM 复合材料。

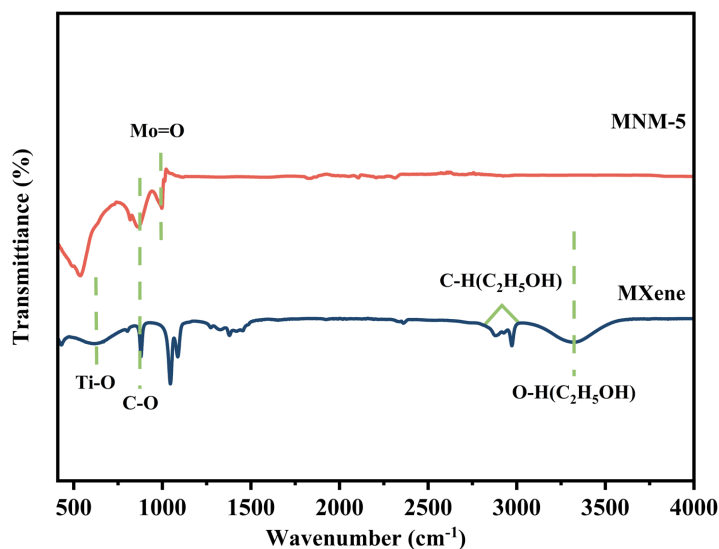


Figure 5. Fourier transform infrared spectra of MXene and MNM-5 composite materials

图 5. MXene 和 MNM-5 复合材料的傅立叶变换红外光谱

4. MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃ 复合材料气敏性能测试

4.1. 最佳工作温度

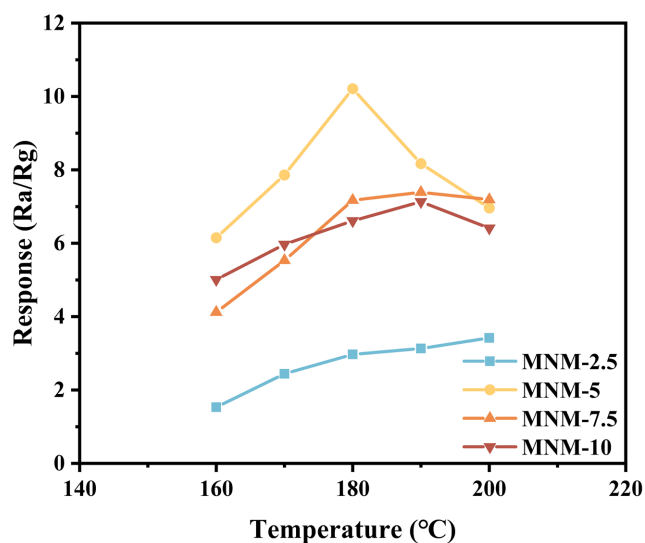


Figure 6. The response plots of MNM-2.5, MNM-5, MNM-7.5 and MNM-10 to 100 ppm n-butanol at 160°C to 200°C

图 6. 在 160°C 至 200°C 时，MNM-2.5、MNM-5、MNM-7.5 和 MNM-10 对 100 ppm 正丁醇的响应图

确定气体传感器的最佳工作温度是至关重要的。对于气体传感器而言,最佳工作温度直接关系到敏感材料对目标气体的响应值,影响材料的气敏特性。

如图6所示,MNM-5复合材料在180℃时对正丁醇的传感性能最好(随后的测试均在180℃下进行),而MNM-7.5与MNM-10复合材料的最佳工作温度相同,但最佳工作温度略高于MNM-5复合材料,响应值略低于MNM-5复合材料。并且与原始的Ni-MoO₃纳米带材料相比,MNM-5复合材料的最佳工作温度降低了80℃。相比之下,MNM-7.5与MNM-10复合材料的最佳工作温度为190℃,MNM-2.5的最佳工作温度在200℃左右。基于MNM-5的传感器在100 ppm正丁醇浓度下的响应值为10.21,均高于MNM-2.5、MNM-7.5和MNM-10的响应值,所以无论从工作温度还是响应值的角度来说,MNM-5复合材料的气敏性能最为卓越。

4.2. 响应/恢复时间

气体传感器中的响应/恢复时间描述的是传感器从暴露在目标气体产生响应至电阻稳定,在脱离目标气体环境后从电阻稳定状态到恢复基准状态的时间。响应/恢复时间直接影响到信号的实时性,较短的响应/恢复时间能在连续的检测中输出准确稳定的电阻信号,有助于提高传感器的稳定性和可靠性。

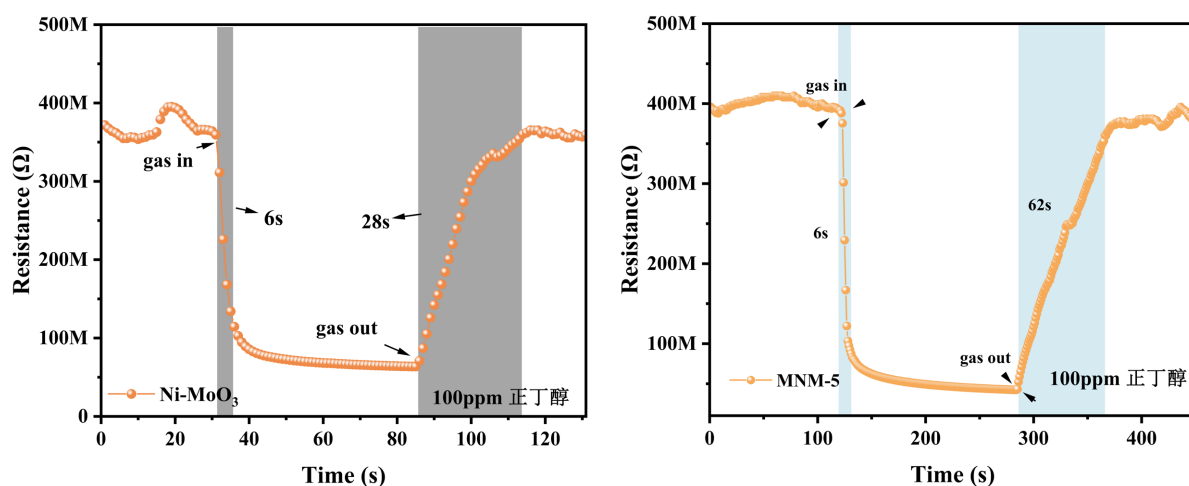


Figure 7. Transient response/recovery curves of Ni-doped MoO₃ and MNM-5 to 100 ppm n-butanol

图7. Ni掺杂MoO₃和MNM-5对100 ppm正丁醇的瞬态响应/恢复曲线

由图7中结果可知,MNM-5复合材料传感器在空气环境中的电阻值较高,传感器从空气转移到装有正丁醇气体的瓶子时,电阻值下降,表明MNM-5复合材料与原始的Ni掺杂MoO₃纳米带一样具有n型半导体的传感特性。MNM-5复合材料传感器的响应/恢复时间分别为6s和62s,与原始的Ni掺杂MoO₃纳米带的6s和28s相比,MNM-5传感器依然保持了对正丁醇气体的快速响应,这可能是由于适量的单层MXene纳米片与Ni掺杂MoO₃纳米带形成的异质结构增强了载流子的迁移率。但碍于材料的形貌或特性等原因,解吸附的效率仍有待提高。

4.3. 气体选择性测试

选择性测试是气体传感器测试中的重要部分。一个选择性好的传感器可以应对复杂的气体环境。

如图8所示,MNM-5样品传感器相较于Ni-Mo样品而言,对这七种气体的响应值都有提升,并且对正丁醇气体依然保持了较好的选择性。

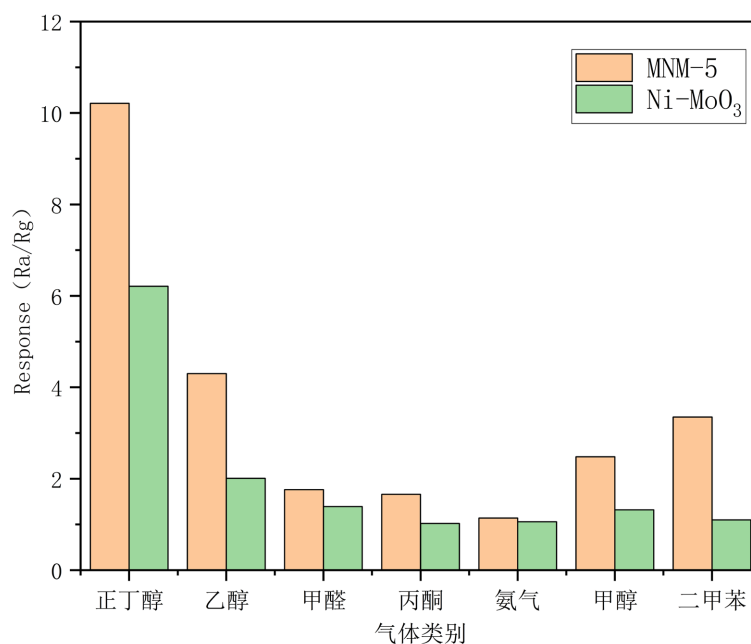


Figure 8. Bar graphs of the response values of MNM-5 samples and Ni-doped MoO₃ samples to different gases

图 8. MNM-5 样品及 Ni 掺杂 MoO₃ 样品对不同气体的响应值柱状图

4.4. 可重复性测试和耐湿性测试

在实际应用中,可重复性测试和耐湿性测试都是测试传感器性能的重要方面。图 9 展示了 MNM-5 复合材料传感器对 100 ppm 正丁醇的响应。虽然受测试时间和测试环境的影响,响应值略微下降,但是在 4 个测量周期中,传感器的响应和恢复曲线的表现非常一致,这也表明了 MNM-5 复合材料传感器具有出色的短期可重复性。

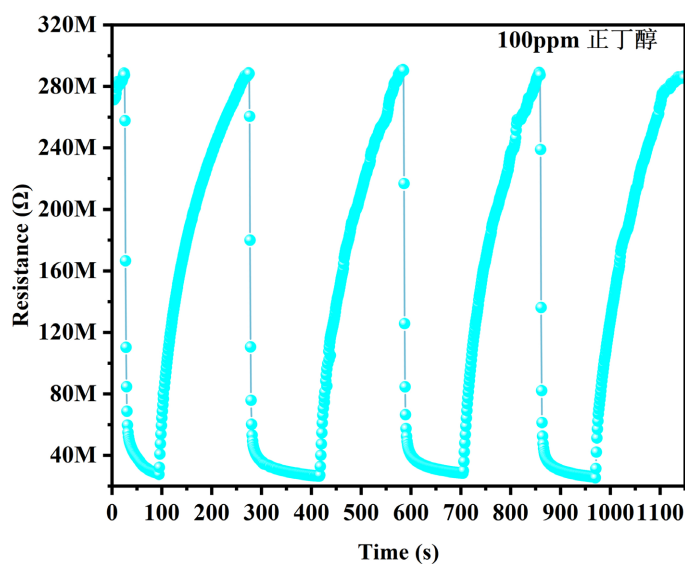


Figure 9. Short-term repeatability test graph of MNM-5 sample for 100 ppm n-butanol

图 9. MNM-5 样品对 100 ppm 正丁醇的短期重复性测试图

而图 10 展示的是 MNM-5 样品传感器在湿度 30%至 90%间, 对 100 ppm 的正丁醇气体的响应示意图。随着湿度的增加, 传感器的响应值相应有所降低, 呈下降趋势。但即使在高湿度的环境下(90%RH), MNM-5 传感器对正丁醇的响应仍能保持在 7.73 左右, 这表明该传感器在潮湿环境中也具有一定的稳定性。

此外, MNM-5 样品传感器在 22 天内对 100 ppm 正丁醇气体的气敏测试结果见图 11。在 22 天内, 传感器的气敏响应略有下降, 但传感器的响应值能够始终保持在 9.06 以上, 下降幅度仍在可接受范围之内, 可见其长期稳定性良好。

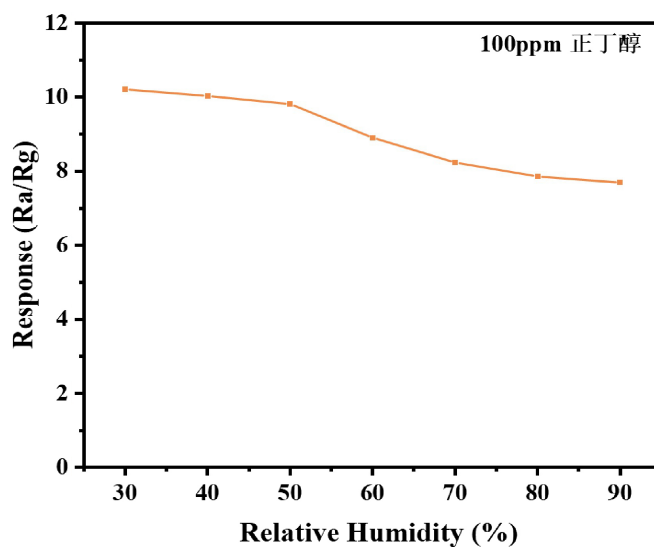


Figure 10. Test plot of MNM-5 sample with 100 ppm n-butanol at humidity of 30%~90%

图 10. MNM-5 样品在湿度为 30%~90%对 100 ppm 正丁醇测试图

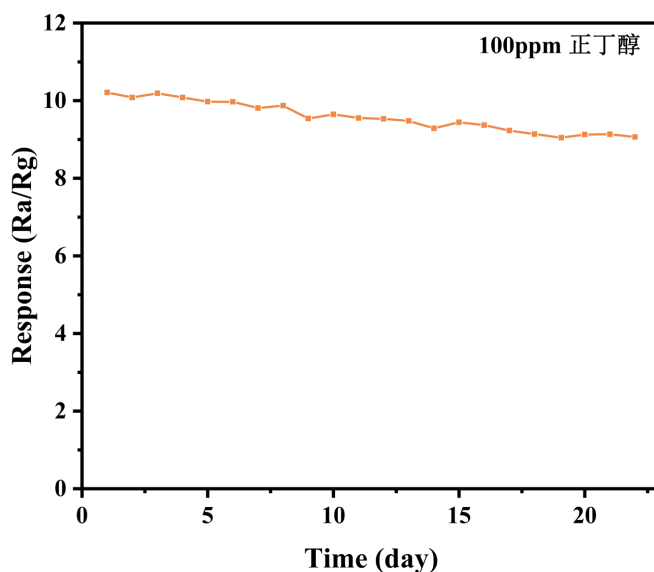
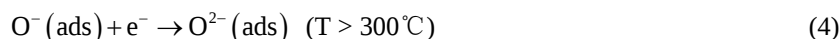
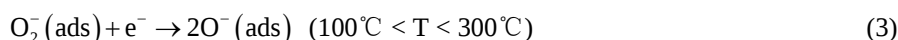
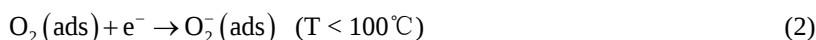


Figure 11. The response curve of MNM-5 samples to 100 ppm n-butanol within 22 days

图 11. 22 天内 MNM-5 样品对 100 ppm 正丁醇的响应曲线图

5. MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni-MoO₃ 复合材料传感机理分析

目前, 解释半导体气体传感器原理的理论基础是气敏材料表面氧与气体分子发生氧化还原反应, 导致传感器电阻发生变化。众所周知, MoO₃ 是一种 N 型半导体氧化物, 自由电子是主要的载流子。当传感器暴露在空气中时, 氧分子吸附在 MoO₃ 纳米带表面捕获自由电子, 形成吸附的表面氧(O^{2-} , O^- 和 O^{2-})。鉴于本研究的最佳工作温度为 180℃, O_2^- 和 O^- 可能是主要的氧物种。反应方程式如下:



当传感器转移到 180℃ 的正丁醇气氛中, 正丁醇分子很容易与吸附在 MoO₃ 纳米带表面的活性氧发生反应。被测气体会先与吸附氧接触, 被氧化生成 CO₂ 和 H₂O。同时, 被氧捕获的自由电子返回导带使得载流子增加, 进而导致耗尽层变窄, 电阻降低。这些过程的方程如 5 和 6 所示。



被吸引的电子随后被释放回导带, 缩小了电子耗尽层。因此, 底层势垒降低, 导致电阻大幅减小。气敏材料的性能很大程度上依赖于气体在其表面的扩散过程和表面反应过程。Ni 掺杂 MoO₃ 纳米复合材料相较于纯 MoO₃, 在气敏性能上有所提升, 这归因于 Ni 掺杂。首先, 与纯 MoO₃ 纳米带材料相比, Ni 掺杂的 MoO₃ 纳米带具有更高的氧吸附性, 带状表面拥有更多的活性位点, 促使更多氧气被吸附, 导致更厚的耗尽层和更高的电阻, 从而产生更高的气敏响应。

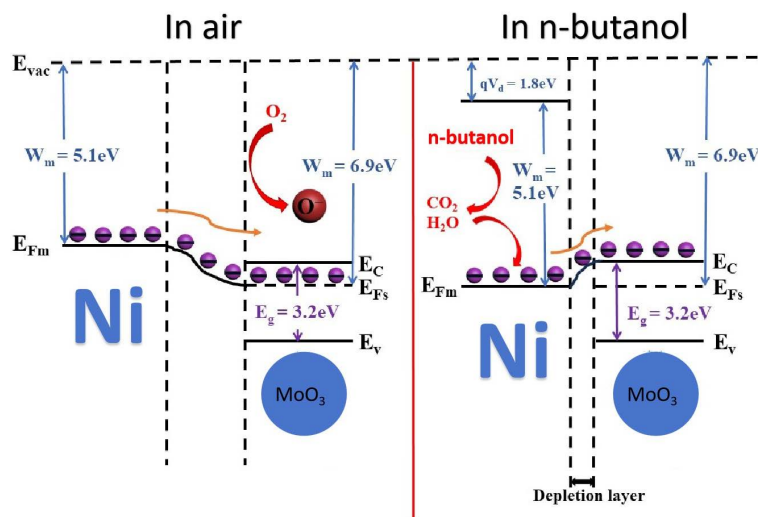


Figure 12. The band structure diagrams of Ni and MoO₃

图 12. Ni 和 MoO₃ 的能带结构图

此外, 由于 Ni (5.1 eV) 的功函数比 MoO₃ (6.9 eV) 更低, 更多的电子倾向于从 Ni 粒子流向 MoO₃, 直到它们的费米能级相等, 如图 12 所示。这在 Ni 和 MoO₃ 之间建立了肖特基势垒, 形成了新的耗尽层,

并诱导了弯曲的强能带。当掺杂 Ni 的 MoO_3 纳米带传感器暴露于正丁醇气体中时, 正丁醇气体与吸附在掺杂 Ni 的 MoO_3 纳米带外层的氧离子之间的相互作用将电子释放回 MoO_3 纳米带, 导致 Schottky 势垒高度显著降低, 传感器电阻降低。在此过程中, 掺杂 Ni 的 MoO_3 纳米带传感器获得了更高的响应值。

MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) 的高载流子迁移率的特性促进了复合材料内部的载流子传输, 从而提高了气敏性能。上述的结果表明, Ni 掺杂 MoO_3 纳米带对正丁醇的强吸附性和高选择性是由其形态结构及成分决定的, 所以传感器的响应主要是由 Ni 掺杂 MoO_3 纳米带引起的, 而二维材料 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 在吸引更多气体分子到异质结构界面区域的同时, 将整体电阻保持在低水平方面发挥了协同作用。

随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量的进一步增加, MNM 复合材料的异质结构具有更多优势, 包括更大的比表面积和更多的活性位点。此外, 水热法使得单层 MXene 纳米片更容易破碎并负载到纳米带的表面, 从而在适当的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量下实现最佳传感性能。然而, 过高的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 浓度会阻塞气体传输通道, 导致载流子迁移率大大降低, 从而降低传感性能。

6. 总结

本论文基于宽禁带 N 型半导体 MoO_3 设计并制备了气体传感器, 在掺杂 Ni 改性的基础上, 引入了不同质量比的二维材料 MXene 并进行了系统的研究和分析。本课题通过采用 Ni 掺杂的改性手段和引入二维材料 MXene 形成异质结来改善 MoO_3 基气敏材料的传感性能, 并研究了其的工作机理。在研究过程中, MNM-5 传感器在 100 ppm 正丁醇浓度下表现出卓越的性能, 具有工作温度低(180°C)、响应高(10.21)、选择性好等优点, 最佳工作温度比纯 MoO_3 材料低 160°C , 响应值是纯 MoO_3 材料的 3.04 倍。最后分析讨论了 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/Ni- MoO_3 复合材料在 180°C 工作的传感机理, 异质结的形成是该复合材料具有卓越传感性能的重要原因。根据以上结论, 我们又讨论了引入二维材料 MXene, 在异质结构中所发挥的作用, 包括降低工作温度、提高比表面积等, 这些传感性能的改进都归功于 MXene 的高载流子迁移率、丰富的可控表面官能团、优异的亲水性、高导电性和较大的比表面积等优良特性。

参考文献

- [1] Cao, E., Song, G., Guo, Z., et al. (2020) Acetone Sensing Characteristics of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{In}_2\text{O}_3$ Nanocomposite. *Materials Letters*, **261**, Article 126985.
- [2] Joshi, N., Hayasaka, T., Liu, Y., Liu, H., Oliveira, O.N. and Lin, L. (2018) A Review on Chemiresistive Room Temperature Gas Sensors Based on Metal Oxide Nanostructures, Graphene and 2D Transition Metal Dichalcogenides. *Microchimica Acta*, **185**, Article No. 213. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-2750-5>
- [3] Ramgir, N., Datta, N., Kaur, M., et al. (2013) Metal Oxide Nanowires for Chemiresistive Gas Sensors: Issues, Challenges and Prospects. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **439**, 101-116.
- [4] Anichini, C., Czepa, W., Pakulski, D., et al. (2018) Chemical Sensing with 2D Materials. *Chemical Society Reviews*, **47**, 4860-4908.
- [5] Zhang, J., Liu, X., Neri, G. and Pinna, N. (2015) Nanostructured Materials for Room-Temperature Gas Sensors. *Advanced Materials*, **28**, 795-831. <https://doi.org/10.1002/adma.201503825>
- [6] Naqvi, S.R., Shukla, V., Jena, N.K., Luo, W. and Ahuja, R. (2020) Exploring Two-Dimensional M_2NS_2 ($\text{M}=\text{Ti}, \text{V}$) MXenes Based Gas Sensors for Air Pollutants. *Applied Materials Today*, **19**, Article 100574. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100574>
- [7] Donarelli, M. and Ottaviano, L. (2018) 2D Materials for Gas Sensing Applications: A Review on Graphene Oxide, MoS_2 , WS_2 and Phosphorene. *Sensors*, **18**, Article 3638.
- [8] Li, J., Han, L., Zhang, X., Sun, H., Liu, X., Lu, T., et al. (2021) Multi-Role TiO_2 Layer Coated Carbon@Few-Layered MoS_2 Nanotubes for Durable Lithium Storage. *Chemical Engineering Journal*, **406**, Article 126873. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126873>