文章编号: 1007-4252(2025)06-0511-06 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0034 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0034

基于 MXene 复合薄膜的氨气传感器研究

宓 倩[1], 王东岳[2,*], 徐慕杰[2], 王海婷[2]
(1. 青岛城市学院机电工程学院, 青岛 266106; 2. 青岛科技大学信息科学技术学院, 青岛 266061)

摘要: 为满足工农业生产中的氨气检测需求, 开发了一种可实时检测氨气体积分数的系统。以碳化钒铝(V_2AlC)为主要原料, 通过刻蚀和热处理工艺制备了纳米 V_2C MXene/V_2O_5 复合薄膜, 并采用喷涂法制备了基于该复合薄膜的氨气传感器。测试了该传感器在不同氨气体积分数下的气敏性能, 结果表明, 复合薄膜传感器具有优异的氨气敏感特性。针对传感器的温湿度误差和信号处理问题, 设计了相关硬件电路并开发了配套程序。通过差动测量电路有效控制了温湿度误差, 同时利用双运放构建仪表放大器, 实现了对输入差分信号的放大。基于 STM32 和 LabVIEW 软件设计并制作了氨气检测装置, 该装置能够实时、快速检测氨气体积分数, 并具备数据保存和超限报警功能, 具有操作简便、实用性强等优点。

关键词: MXene; 氨气; 薄膜传感器; 差动测量; LabVIEW
中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Research on ammonia sensor based on MXene composite film

MI Qian[1], WANG Dongyue[2,*], XU Mujie[2], WANG Haiting[2]
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao City University, Qingdao 266106, China; 2. School of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: To address the need for ammonia detection in industrial and agricultural applications, a real-time ammonia detection system was developed. V_2C MXene/V_2O_5 composite films were synthesized through etching and heat treatment using V_2AlC as the primary material, and the ammonia sensor was fabricated using a spraying technique. The gas-sensing performance of the film sensor was evaluated at varying ammonia volume fractions. The results indicate that the composite film sensor exhibits significant sensitivity to ammonia gas. Hardware circuit design and program development were performed to address the temperature and humidity errors as well as signal processing of the sensor. A differential measurement circuit was implemented to minimize temperature and humidity errors. Two operational amplifiers were utilized to construct instrumentation amplifiers for the amplification of input differential signals. Based on

收稿日期: 2025−06−24; **修订日期:** 2025−07−17
基金项目: 青岛市自然科学基金青年项目 (No. 24-4-4-zrjj-69-jch).
作者简介: 宓 倩(1996—), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为传感器检测技术(E-mail: mq20140925@163.com).
通信作者: 王东岳(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微纳传感器与智能感知技术 (E-mail: dywang@qust.edu.cn).

STM32 and LabVIEW, the ammonia detection device was designed and fabricated. This device is capable of real-time ammonia volume fraction detection, data storage, and over-limit alarming, offering the benefits of straightforward operation and high practicality.

Key words: MXene; ammonia; thin film sensor; differential measurement; LabVIEW

0 引言

人们生活水平的不断提高和对工业生产技术的进步推动了对各类气体传感器需求的快速增长。尤其在有毒有害气体检测领域，气体传感器的研发取得了显著进展。作为一种被广泛应用于化工、化肥、医药、农药、能源及合成纤维等领域的工业有毒气体，氨气对动物或人体的上呼吸道具有刺激和腐蚀作用，并常被吸附于皮肤黏膜和眼结膜上，从而引发刺激和炎症[1]。人体持续吸入质量浓度为 700 mg·m^{-3} 的氨气 30 min 即会中毒；而当氨气质量浓度升至 1 750~4 000 mg·m^{-3} 时，甚至可能危及生命[2]。因此，无论是在空气质量监测还是医疗健康领域，氨气检测都具有重要意义。

氨气传感器通过气敏元件检测环境中的氨气含量，将气体含量信号转化为电信号，并通过对电信号的调制、转换、分析和传输，最终输出可用信息。目前，氨气检测器件主要以电化学传感器、半导体电阻式传感器和光学传感器为主[3-5]。其中，以金属氧化物和二维半导体材料为代表的半导体电阻式氨气传感器因具有高灵敏度、长寿命、快速响应及低成本等特点，已成为全球范围内应用最广泛的气体传感器之一[6]。电阻型半导体气体传感器的工作原理是通过敏感薄膜吸附或脱附目标气体分子，引发半导体材料载流子浓度的变化，从而导致传感器电阻发生改变。通过测量传感器电阻的变化，可实现对气体含量的检测。

值得注意的是，MXene 材料具有优异的金属导电性和丰富的表面官能团，因而在气湿敏传感器领域展现出巨大的应用潜力[7]。MXene 及其衍生物薄膜对氨气分子具有优异的吸附性能，非常适合用作氨气敏感材料[8]。另一方面，LabVIEW 作为虚拟仪器领域最具代表性的图形化编程开发平台之一，被广泛应用于国内外科研和工程领域，人们基于该平台开发了多款高性能测量系统[9]。

本文结合微电子技术、纳米技术及传感器检测技术等多学科技术手段，制备了碳化钒 MXene（V_2C MXene）/五氧化二钒（V_2O_5）复合薄膜气敏传感器，并设计了基于 LabVIEW 的氨气含量检测系统。该设计成功将纳米技术应用于气体检测，展现出显著的创新性与高度的实用价值。

1 实验

1.1 器件制备

选用聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）作为传感器衬底，利用微纳制造技术，通过溅射、光刻和蚀刻等工艺制备叉指回形平面电极图案，并通过喷涂工艺制备气体传感器。传感器叉指电极的尺寸为 8 mm×8 mm，厚度为 300 μm，电极间距为 200 μm。叉指回形平面电极设计不仅能最大程度地减小电阻型气体传感器的初始电阻，还有利于提高对敏感薄膜电学性质变化的检测的灵敏度。

本文所提出的基于 V_2C/V_2O_5 薄膜的氨气传感器制备流程如图 1 所示。首先，将 1 g LiF 溶于 20 mL 浓度为 9 mol·L^{-1} 的 HCl 中（容器为聚丙烯瓶），搅拌 5 min 使其完全溶解。随后，加入 1 g V_2AlC 粉末（缓慢加入以避免剧烈反应），并将溶液置于 35 ℃ 环境下反应 24 h。反应完成后，对产物进行离心洗涤，该过程重复多次直至上清液的 pH 值不低于 6，再在 60 ℃ 下进行真空干燥处理，最终获得多层 V_2C MXene 材料。将所得 V_2C MXene 粉末置于煅烧炉中，以 1 ℃·min^{-1} 的升温速率加热至 350 ℃，并保温 2 h。由于 V_2C MXene 在高温和氧化环境中不稳定，表面易被氧化生成 V_2O_5。在 V_2C MXene

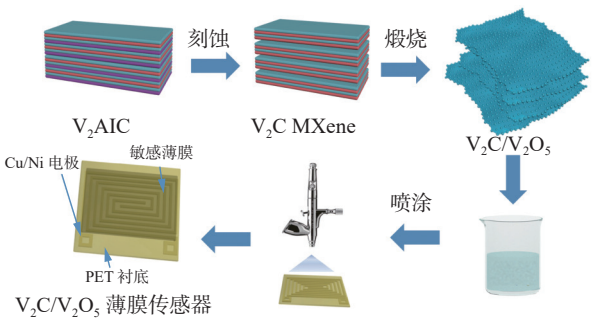

图 1 V_2C MXene/V_2O_5 薄膜传感器的制备工艺流程

Fig. 1 Preparation process flow of V_2C MXene/V_2O_5 thin film sensor

热处理过程中原位生成 V_2O_5, 基本保持了 V_2C MXene 的原有微观结构, 并实现了 V_2O_5 的均匀分布, 从而提供了更多的气体吸附位点。

1.2　仪器与表征

为研究 V_2C MXene/V_2O_5 薄膜材料的微观形貌, 采用扫描电子显微镜(SEM)对薄膜的微观结构进行分析。如图 2 所示, 经过高温煅烧后, 风琴状的多层 V_2C MXene 表面衍生出分布均匀的 V_2O_5 纳米颗粒。这些颗粒具有较大的比表面积, 适合作为气敏传感器的敏感材料[10-11]。气敏实验装置如图 3 所示。采用数据采集装置(Agilent 34410A)实时测量传感器电阻的变化, 并通过 RS-232 数据总线将数据传输至计算机, 实现数据的实时显示与存储。通过在集气瓶中稀释高纯度氨气样气来获得不同含量的氨气, 并检测气敏薄膜传感器在不同含量下的电阻响应。

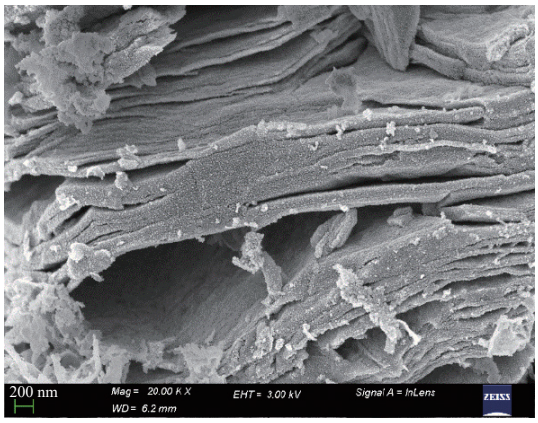

图 2　V_2C/V_2O_5 的 SEM 表征图

Fig. 2　SEM characterization diagram of V_2C/V_2O_5

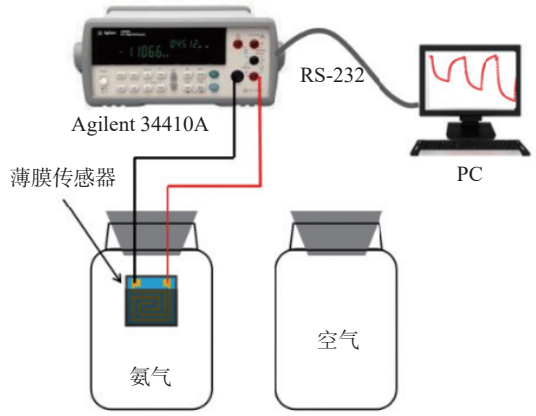

图 3　气敏实验装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the gas-sensitive experimental apparatus

2　研究结果

2.1　传感器的氨气敏感特性

在 25 ℃ 条件下, 将 V_2C MXene/V_2O_5 气敏传感器置于不同含量的氨气环境中, 测试其电阻响应特性。如图 4(a)所示, 传感器对体积分数为 10×10^{-6}、20×10^{-6}、30×10^{-6}、50×10^{-6} 和 100×10^{-6} 的氨气的响应电阻分别为 5.98 MΩ、5.04 MΩ、4.53 MΩ、3.84 MΩ 和 2.18 MΩ。可见, 随着氨气体积分数的持续增加, 气敏传感器电阻显著下降。当从氨气环境切换回空气后, 传感器电阻可恢复至初始基值, 展现出优异的恢复性能。为研究传感器电阻与氨气体积分数之间的关系, 对二者进行线性拟合, 结果如图 4(b)所示。传感器电阻值 R 与氨气体积分数 c 的关系式为 $R = 6.21 - 0.04\,c$, 拟合度线性相关系数为 0.9734, 表明薄膜传感器电阻与氨气体积

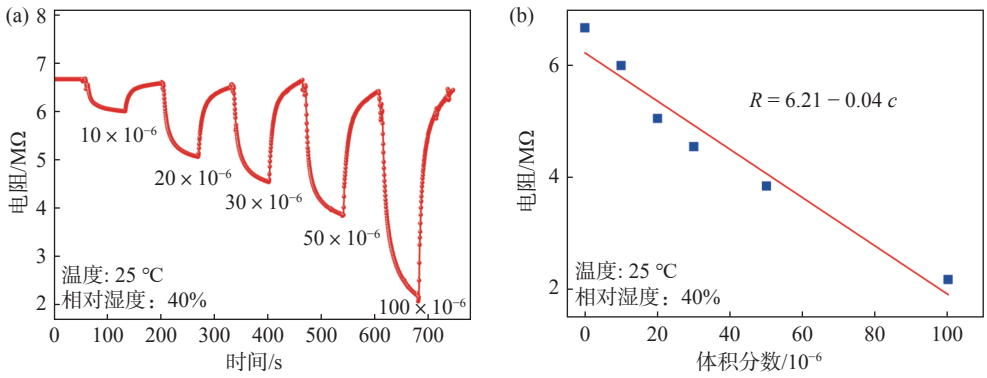

图 4　(a)不同氨气体积分数下传感器电阻的变化; (b)传感器电阻随氨气体积分数变化的拟合曲线

Fig. 4　(a) Variation of sensor resistance under different ammonia volume fractions; (b) fitting curve of sensor resistance as a function of ammonia cvolume fraction

分数存在一定的线性相关性，可满足实际应用需求。将传感器的响应定义为初始电阻与在氨气中的稳态电阻之比，经计算可得氨气体积分数为 100×10^{-6} 时，传感器的响应为 3.05，优于其他文献中单一 V_2O_5 或 MXene 材料的氨气响应性能[12-13]。

2.2 温度和湿度对传感器性能的影响

敏感材料的表面特性易受周围环境的影响。尤其值得注意的是，环境温度和湿度的变化易对气敏传感器的敏感性能造成显著干扰。如图 5 所示，将 V_2C MXene/V_2O_5气敏传感器置于不同温度和湿度环境中进行测试。结果显示：随着温度的升高，传感器的基值电阻缓慢降低；而随着湿度的增加，传感器的基值电阻显著下降。这表明，温度和湿度的变化均会对传感器的性能产生干扰。

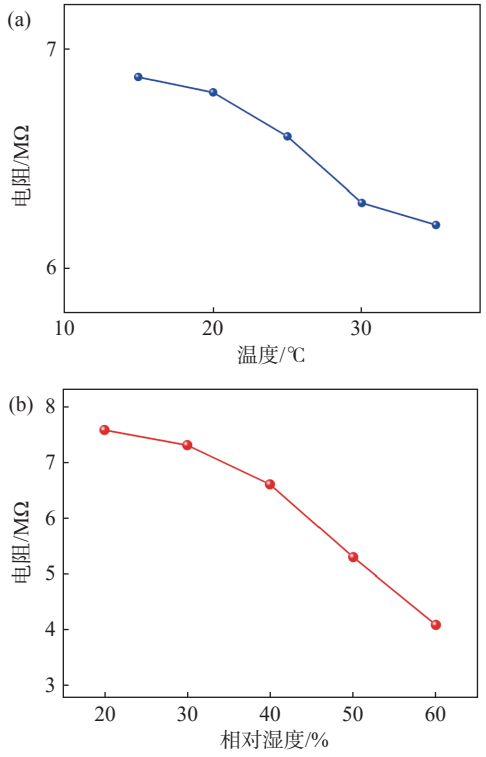

图 5 (a)温度和(b)湿度对传感器电阻的影响

Fig. 5 Influence of (a) temperature and (b) humidity on sensor resistance

为抑制温度和湿度对气敏传感器的干扰，并实现对氨气体积分数的实时监测与超限报警，本研究采用传感器差动测量方法，基于 LabVIEW 设计并开发了一套氨气检测系统。如图 6(a)所示，采用相同制备工艺制作了两个电阻基值和敏感性能基本一致的 V_2C MXene/V_2O_5 传感器 R1 和 R2。在测量过程中，R1 作为检测传感器来感知氨气体积分数变化，而 R2 作为参比传感器仅感知环境温度和湿度的变化。R1、R2 与固定电阻 R3、R4 共同组成桥式电路。桥式电路的输出电压 ΔU 与传感器电阻之间的关系可表示为：

$$\Delta U = U_p - U_n = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4}\right)V_{CC} \tag{1}$$

式中，U_p 为氨气传感器与参比传感器之间的电位差，U_n 为电阻 R3 和 R4 之间的电位差，R_1~R_4 分别为电阻 R1~R4 的电阻值，V_{CC} 为电源电压。设定电阻 R5~R7、R9 的电阻值满足 $R_5 = R_6 = R_7 = R_9$，电路输出电压 U_o 为：

$$U_o = \left(2 + \frac{2R_5}{R_8}\right)\Delta U \tag{2}$$

式中，R_5、R_8 分别为电阻 R5、R8 的电阻值。

如图 6(b)所示，整个系统以 STM32 微处理器为核心。传感器测量电路输出的电压信号经 AD 转换后传输至处理器，并通过 RS232 串口发送至 PC 端。同时，利用 LabVIEW 开发了相应的氨气检

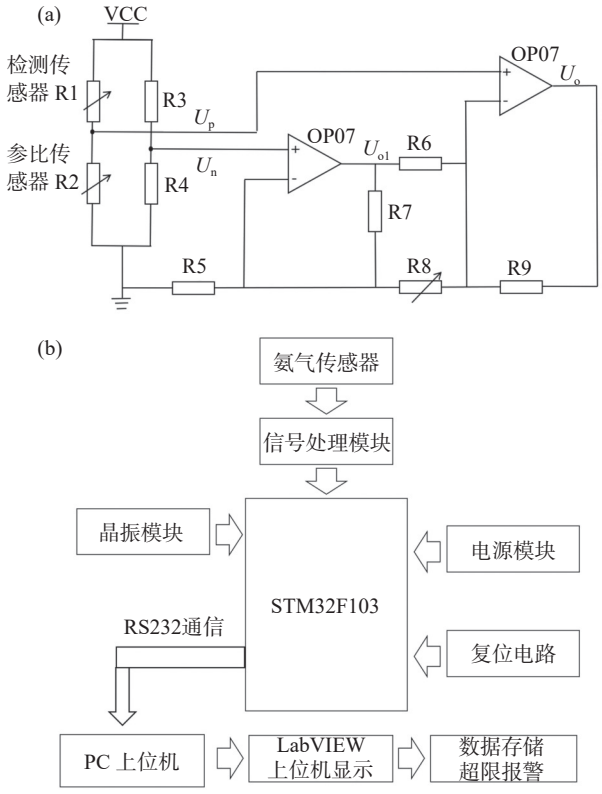

图 6 (a)传感器信号处理电路；(b)检测系统结构框图

Fig. 6 (a) Processing circuit of sensor signal; (b) the block diagram of detection system

测上位机模块, 整个程序主要由 VISA 串口通信、数据存储和超限报警等模块组成。

由于温度和湿度的变化会同时影响传感器 R1 和 R2, 因此温、湿度变化引起的这两个传感器电阻的变化能够相互抵消。此时, 桥式电路的输出电压 ΔU 仅与氨气引起的传感器 R1 的电阻变化相关。测试结果如图 7 所示, 可以看出, 在不同温、湿度条件下, 电压 U_p 的值基本稳定在 2.5 V 左右, 表明该电路能够有效抑制温、湿度变化引起的传感器测量误差。

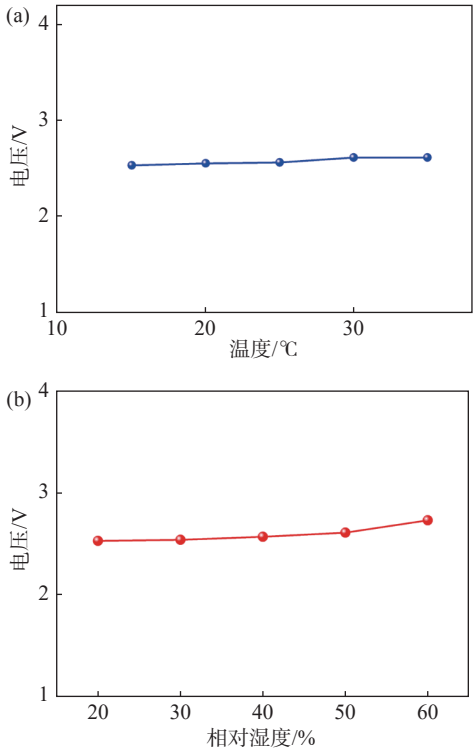

图 7　不同(a)温度和(b)湿度条件下的桥式电路输出电压值

Fig. 7 Output voltage values of bridge circuit under varying (a) temperature and (b) humidity conditions

氨气检测装置的检测界面如图 8 所示。可以看出, 在不同氨气体积分数与空气之间循环切换时, 检测系统能够实时显示氨气体积分数, 表明所制备的复合薄膜传感器对氨气体积分数变化表现出良好的响应特性。值得指出的是, 该系统不仅满足测试要求, 还能够实现超限报警。

3　总结

传感器检测技术在科学研究中具有广泛的应用前景。本文融合微电子技术、信号处理以及软件开发等多学科知识, 采用软硬件结合的方式, 设计并制作了一种氨气检测装置。研究中, 通过刻蚀法与原位生长技术制备了基于复合敏感薄膜的氨气传感器, 并设计了一套结合传感器差动测量电路与 LabVIEW 软件的氨气检测系统。同时, 搭建实验平台对传感器及其检测系统进行了测试与研究。该检测装置贴近工程应用与生活实际, 展现出良好的创新性与应用价值。

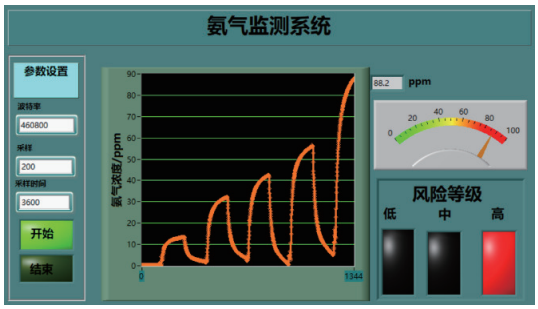

图 8　氨气监测系统的 LabVIEW 检测界面

Fig. 8 LabVIEW detection interface of ammonia monitoring system

参考文献:

[1] 陈冠斌, 黄健, 黄智超, 等. 基于物联网技术的出水氨氮智能检测系统 [J]. 物联网技术, 2024, 14(11): 23-27, 30.

[2] 时国龙, 胡国平, 蔡家柱, 等. 面向畜禽场景氨气检测的无源 RFID 传感标签研制及应用 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 202-209.

[3] 黄昊, 杨琳, 肖邦, 等. 混合电位型 In_2O_3 氨气传感器的性能研究与优化 [J]. 仪表技术与传感器, 2020(10): 17-24, 77.

[4] 郝龙, 赵全, 胡家伟, 等. 凝胶电解液型电化学有毒气体传感器的性能分析 [J]. 电子技术, 2023, 52(4): 16-18.

[5] 郑传涛, 华莹, 刘洋, 等. 用于单片机实验教学的红外激光气体检测仪 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(1): 50-55.

[6] 李炜灿, 战光辉. La 掺杂 SnO_2 气体传感器制备及 NH_3 检测气敏性能研究 [J]. 陶瓷学报, 2024, 45(5): 1003-1012.

[7] 张继豪, 梁峻阁, 江世鹏, 等. 基于 SnO_2-MXene 的微波阵列气体传感器 [J]. 传感器与微系统, 2025, 44(7): 41-45.

[8] WANG D Y, ZHANG D Z, YANG Y, et al. Multifunctional latex/polytetrafluoroethylene-based triboelectric nanogenerator for self-powered organ-like MXene/metal-organic framework-derived CuO nanohybrid ammonia sensor[J]. ACS Nano, 2021, 15(2): 2911-2919.

[9] 郑冬冬. 基于 LabVIEW 的 CO_2 传感器自标定系统设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2022(4): 101-104.

[10] WANG Z Q, TAN G Q, ZHANG B X, et al. Intrinsic polarized electric field induces a storing mechanism to achieve energy storing catalysis in V_2C MXene[J]. Advanced Materials, 2024, 36(3): 2307795.

[11] WANG D Y, ZHANG D Z, LI Y Q, et al. V_2CT_x MXene/Ni-metal organic framework-derived V_2O_5/NiO nanohybrid methane sensors for fault detection of lithium-ion battery[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 428: 137261.

[12] DUC PHUONG NAM N, THI HUONG D, HAI ANH P, et al. Microwave-synthesized V_2O_5 nanoparticles for ammonia sensing at room temperature[J]. Materials Science and Engineering: B, 2024, 307: 117533.

[13] KARMAKAR S, DEEPAK M S, NANDA O P, et al. 2D V_2C MXene based flexible gas sensor for highly selective and sensitive toluene detection at room temperature[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2024, 6(5): 3717-3725.