

УДК 621.382

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

©2025 г. С. С. Налимова^{1, *}, З. В. Шомахов², Н. А. Морозова¹,
В. М. Кондратьев^{3, 4}, К. Д. Буй¹, В. А. Мошников¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”
им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, 5 лит. Ф, Санкт-Петербург, 197022 Россия

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова,
ул. Чернышевского, 173, Нальчик, 360004 Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

⁴Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
им. Ж.И. Алферова Российской академии наук (Алферовский университет),
ул. Хлопина, 8, к. 3, Санкт-Петербург, 194021 Россия

*e-mail: sskarpova@list.ru

Поступила в редакцию 26.11.2024 г.

После доработки 19.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

Современный этап развития газовой сенсорики характеризуется расширением диапазона применяемых материалов. Для совершенствования характеристик сенсоров, в том числе снижения рабочих температур, проводятся исследования возможностей применения дихалькогенидов переходных металлов. В данной работе гидротермальным синтезом получены газочувствительные слои MoS_2 . Проведены их исследования методами растровой электронной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Взаимодействие синтезированных слоев с парами изопропилового спирта при комнатной температуре проанализировано с помощью спектроскопии импеданса. Показаны возможности их применения для детектирования восстанавливающих газов при комнатной температуре.

Ключевые слова: газовая сенсорика, дисульфид молибдена, гидротермальный синтез, спектроскопия импеданса, комнатная температура

DOI: 10.31857/S0002337X25010116, **EDN:** KFWYSU

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие газовой сенсорики происходит в направлении применения современных разработок в области материаловедения. Помимо традиционно используемых оксидов металлов, проводятся исследования газочувствительных свойств новых материалов. Эти разработки направлены в первую очередь на решение главных проблем адсорбционных полупроводниковых сенсоров на основе оксидов металлов (ZnO [1, 2], SnO_2 [3, 4], TiO_2 [5], In_2O_3 [6] и др.), связанных с высокими рабочими температурами [7] и отсутствием селективности [8]. В частности, была продемонстрирована способность такого двумерного материала, как графен, изменять свои электрофизические характеристики при взаимодействии с различными газами (NO_2 , NH_3 , CO и H_2O) [9], а также показана возможность обнаружения сверхнизких концент-

раций газов при комнатной температуре [10]. Эти открытия побудили ученых вести дальнейшие исследования, направленные на улучшение характеристик газовых сенсоров на основе 2D-материалов [11, 12]. Благодаря таким характеристикам, как высокое соотношение поверхности к объему, высокая адсорбционная способность, уникальные электрические свойства [13], зависящие от толщины структуры, MoS_2 является одним из наиболее перспективных слоистых материалов для создания на его основе газовых сенсоров [14].

Синтез MoS_2 возможен с использованием разнообразных технологий изготовления [15], таких как механическое или жидкостное отслаивание, физическое или химическое осаждение из газовой фазы, синтез из растворов и т.д. В частности, известно, что частицы MoS_2 различной формы, включая нанотрубки, сфе-

рические и иерархические структуры, могут быть синтезированы в гидротермальных условиях при вариации технологических режимов [16, 17].

Принцип работы полупроводниковых газовых сенсоров основан на адсорбции молекулы-мишени на поверхности газочувствительного слоя с последующим их взаимодействием, вследствие чего происходит изменение электрического сопротивления материала [18]. Поэтому чувствительные свойства полупроводниковых газовых сенсоров в значительной степени зависят от их структуры и состава, а для MoS_2 — в том числе и от количества слоев.

Все существующие на сегодняшний день газовые сенсоры на основе MoS_2 способны регистрировать ограниченное количество типов газов (в основном оксиды азота [19], аммиак [20] и триэтиламин [21]). К тому же они могут работать только в инертной атмосфере (например, N_2) [22]. Для улучшения чувствительности, селективности, стабильности и быстродействия газовых сенсоров на основе MoS_2 применяются различные методы его модификации наночастицами благородных металлов или оксидов металлов, такие как изменение морфологии соединения, геометрии или структуры поверхности, создание нанокомпозитов и ван-дер-ваальсовых гетероструктур. Существование многообразия морфологических форм дисульфида молибдена приводит к различному количеству реакционно-способных центров.

Помимо традиционного измерения сопротивления на постоянном токе, для измерения отклика газовых сенсоров может быть использована спектроскопия импеданса [23–26]. В работе [27] спектроскопия импеданса была использована в качестве газочувствительного сигнала при детектировании H_2S сенсором на основе ZnO , инкорпорированного восстановленным оксидом графена. Также этот метод был применен при разработке сенсоров водорода на основе слоев ZnO [28] и сенсоров органических паров на основе слоев полититанатов калия [29]. Этот метод позволяет исследовать физические и химические процессы, влияющие на электрические характеристики полупроводниковых газовых сенсоров.

Целью работы являлось исследование возможности использования сенсорных слоев MoS_2 , полученных гидротермальным методом, в качестве газовых сенсоров, работающих при комнатной температуре, с использованием вещественной и мнимой составляющих импеданса в качестве газоаналитического отклика.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Газочувствительные слои на основе иерархических наноструктур MoS_2 были синтезированы с помощью низкотемпературного гидротермального метода. В качестве исходных компонентов использовались водные растворы молибдата натрия $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, тиомочевины $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ и щавелевой кислоты $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Затем их смешивали в объемном соотношении 1 : 2 : 1. Готовый раствор помещали в автоклав из нержавеющей стали с расположенной на дне сенсорной платформой и нагревали в печи. Синтез проводили при температуре 200°C в течение 14 ч.

Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) были проведены исследования морфологии поверхности синтезированных иерархических структур MoS_2 . Для анализа образцов использовался микроскоп Zeiss Supra 25 (Zeiss, Германия).

Состав поверхности полученных образцов был проанализирован методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Измерения проходили с помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра K-Alpha (Thermo Scientific, США), в экспериментах использовалось монохроматическое излучение AlK_α с энергией 1486 эВ. Обзорные спектры были получены в диапазоне энергий связи от 0 до 1350 эВ. Также были получены спектры остовных уровней отдельных элементов. Анализ спектров был проведен с помощью программного обеспечения OriginLab. Так как на поверхности элементы находятся в связанных состояниях, была проведена деконволюция спектра на несколько составляющих, описываемых функцией Гаусса.

Газочувствительные свойства образцов были изучены при комнатной температуре под воздействием паров изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm. С помощью прижимных контактов образец фиксировался внутри камеры, в которую подавалась определенная концентрация необходимого газа. Спектры импеданса измерялись при воздействии газа-реагента и в воздушной среде с помощью измерителя импеданса Z-500P (Элинс, Россия) в диапазоне частот от 1 Гц до 500 кГц.

При измерении спектров импеданса отклик для каждой частоты определялся с использованием действительной части импеданса в виде:

$$S_{\text{Re}} = \text{Re}(Z)_{\text{в}} / \text{Re}(Z)_{\text{г}},$$

где $\text{Re}(Z)_{\text{в}}$ — действительная часть импеданса в атмосфере воздуха, $\text{Re}(Z)_{\text{г}}$ — действительная часть импеданса в присутствии целевого газа.

Аналогично, отклик с использованием мнимой части импеданса был рассчитан как:

$$S_{\text{Im}} = \text{Im}(Z)_{\text{в}} / \text{Im}(Z)_{\text{г}},$$

где $\text{Im}(Z)_{\text{в}}$ — мнимая часть импеданса в атмосфере воздуха, $\text{Im}(Z)_{\text{г}}$ — мнимая часть импеданса в присутствии целевого газа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ морфологии поверхности образцов показал, что наночастицы MoS_2 представляют собой иерархические структуры, состоящие из нанолистов, внешне похожие на цветы (рис. 1). Толщина листов составляет порядка 10 нм, а размер частиц — порядка 600 нм.

Обзорный РФЭС свидетельствует о том, что на поверхности присутствуют следующие химические элементы: Mo, S, O, C (рис. 2). Более того, он доказывает, что молибден и сера присутствуют в составе MoS_2 , наличие кислорода свидетель-

ствует о том, что поверхности образцов частично окислены, а наличие углерода — о том, что происходит адсорбция углеродсодержащих молекул из атмосферы. При более детальном рассмотрении спектра линии Mo3d (рис. 3) и разложении ее на составляющие видно, что в составе исследуемых образцов присутствует молибден со степенью окисления 4+ ($\text{Mo3d}_{5/2}$ при 228.8 эВ, $\text{Mo3d}_{3/2}$ при 232.4 эВ), положения пиков которого соответствуют данным [30] для соединения MoS_2 . Также наблюдается наличие молибдена со степенью окисления 6+ ($\text{Mo3d}_{5/2}$ при 232.4 эВ, $\text{Mo3d}_{3/2}$ при 235.8 эВ), что говорит о том, что на поверхности образцов присутствует оксид молибдена MoO_3 [31]. Из-за перекрытия диапазонов энергий связи Mo3d и серы на спектре также наблюдается пик с энергией связи 229 эВ, который соответствует уровню серы S2s . При исследовании спектра линии серы S2p (рис. 4) были обнаружены два пика: $\text{S2p}_{3/2}$ с энергией связи 161.6 эВ и $\text{S2p}_{1/2}$ с энергией связи 162.7 эВ. Также на нем присутствует пик с энергией 168.9 эВ, указывающий на явление возбуждения поверхностных плазмонов.

Анализ спектра линии кислорода O1s (рис. 5) показал наличие трех составляющих: пик, максимум которого приходится на более низкую энергию связи (530.4 эВ), соответствует кисло-

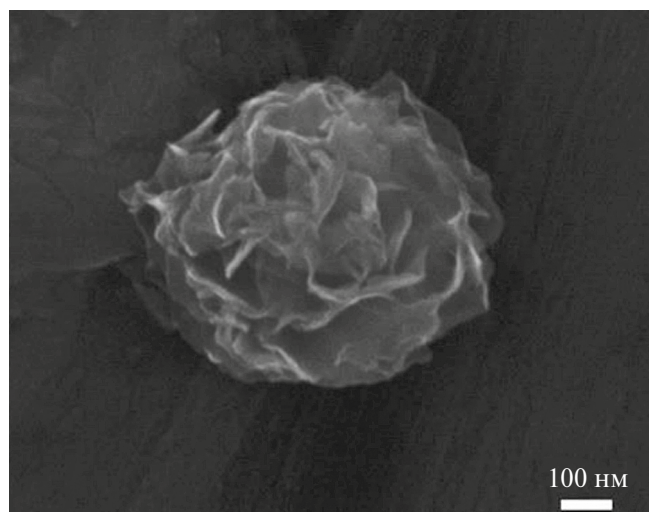


Рис. 1. РЭМ-изображение MoS_2 .

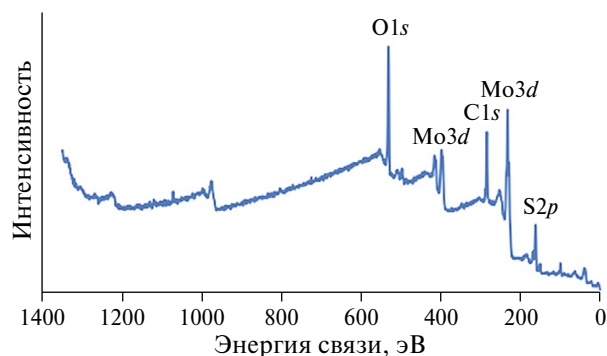


Рис. 2. РФЭ-спектр MoS_2 .

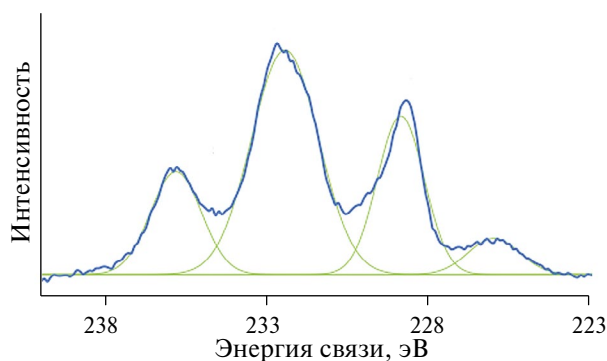


Рис. 3. Энергетический спектр линии Mo3d (синий), разложенный на модельные гауссианы (зеленый).

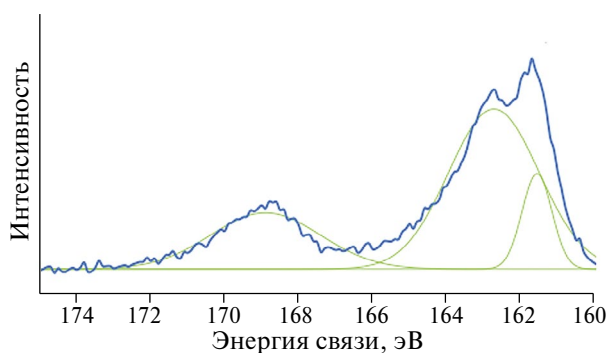


Рис. 4. Энергетический спектр линии S2p (синий), разложенный на модельные гауссианы (зеленый).

роду кристаллической решетки в соединении MoO_3 , второй пик — адсорбированному кислороду в виде ОН-групп (531.5 эВ), а третий — слабосвязанному кислороду, адсорбированному на поверхности в виде карбоксильных групп (532.8 эВ) [32]. При этом содержание кислорода, входящего в состав поверхностных гидроксильных групп, составляет 52%, а кислорода карбоксильных групп — 31%. Доля кислорода кристаллической решетки незначительна (17%).

Был исследован отклик дисульфида молибдена к парам изопропилового спирта при комнатной температуре (рис. 6). Взаимодействие MoS_2 с этим газом приводит к значительным изменениям действительной (рис. 7) и мнимой (рис. 8) составляющих комплексного сопротивления.

На низких частотах значение отклика, рассчитанное по вещественной части импеданса, практически не изменяется ($S_{\text{Re}} = 2.8$). При частоте больше 6 кГц значение S_{Re} начинает увеличиваться и достигает максимума ($S_{\text{Re}} = 3.82$) при $f = 60$ кГц, при дальнейшем увеличении ча-

стоты S_{Re} уменьшается. Отклик, рассчитанный по мнимой части, достигает максимального значения при частоте 278 кГц ($S_{\text{Im}} = 4.34$). Наблюдается рост отклика с увеличением частоты начиная с 0.2 кГц.

Снижение величины мнимой части импеданса может быть объяснено адсорбцией молекул изопропанола между слоями частиц дисульфида молибдена. Если рассматривать данную систему как конденсатор, между электродами которого находятся частицы MoS_2 и воздух, то замена молекул кислорода на молекулы изопропилового спирта будет приводить к уменьшению емкости. Появление поляризационных эффектов может приводить к сдвигу максимума $\text{Im}(Z)$ в сторону низких частот.

Полученные в результате гидротермального синтеза наночастицы MoS_2 (рис. 1) обладают широкими возможностями для адсорбции молекул газов благодаря большому количеству центров адсорбции на поверхности слоев и эффективному удержанию адсорбированных молекул между слоями.

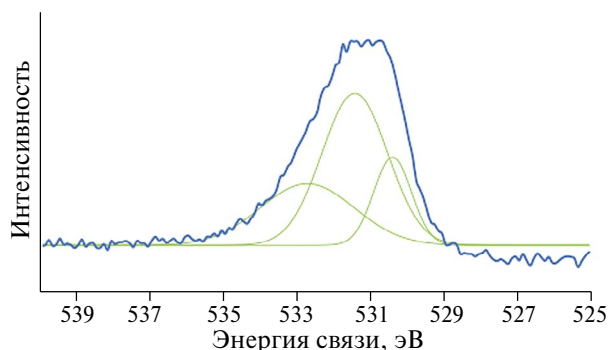


Рис. 5. Энергетический спектр линии O1s (синий), разложенный на модельные гауссианы (зеленый).

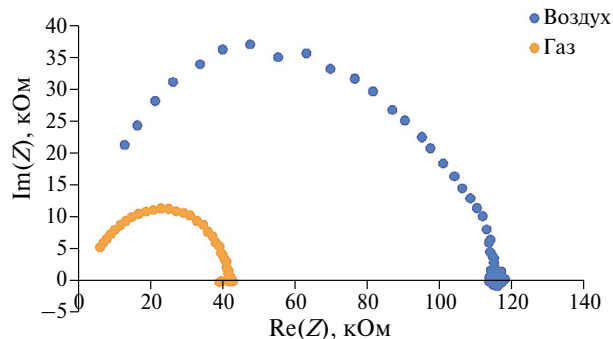


Рис. 6. Диаграммы Найквиста газочувствительного слоя MoS_2 в атмосфере различного состава.

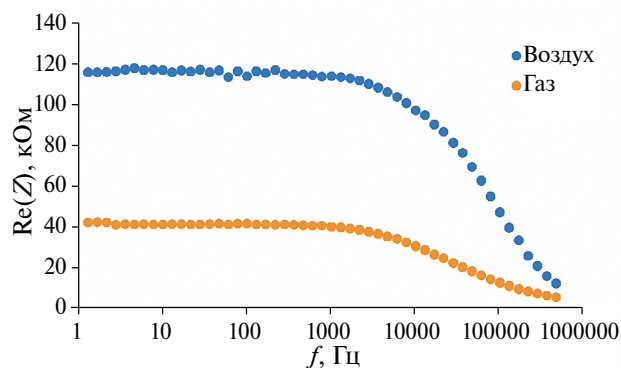


Рис. 7. Частотные зависимости действительной части импеданса газочувствительного слоя MoS_2 в атмосфере различного состава.

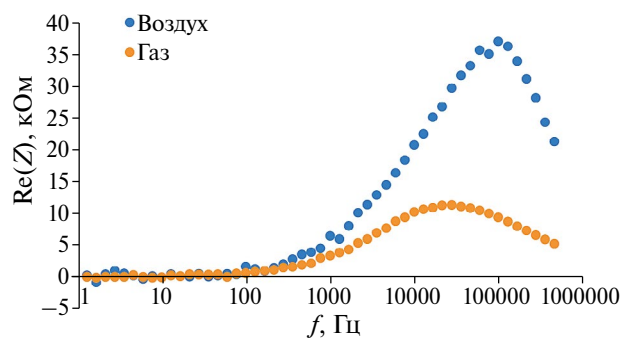


Рис. 8. Частотные зависимости мнимой части импеданса газочувствительного слоя MoS_2 в атмосфере различного состава.

По результатам РФЭС можно сделать вывод о том, что поверхность слоев MoS_2 при нахождении в атмосфере воздуха окисляется. Хорошая адсорбционная способность таких частиц подтверждается результатами исследования спектра O1s, из которого следует высокая степень заполнения поверхности гидроксильными и карбоксильными группами. Согласно данным [33–35], OH-группы могут являться адсорбционными центрами для молекул спиртов. Следовательно, вклад в повышенную способность полученных наночастиц MoS_2 к адсорбции молекул изопропанола вносят их морфология (слоистая структура с высокой удельной поверхностью) и большое содержание адсорбционных центров.

Анализ литературы показал, что сенсорные слои на основе MoS_2 при комнатной температуре чаще всего используются для детектирования NO_2 (окисляющий газ), при этом величины отклика достигают, например, 48% к 50 ppm [36] и 42% к 200 ppm NO_2 [37]. Для детектирования восстанавливающих газов сенсоры на основе MoS_2 работают при нагревании. Например, при 130°C был достигнут отклик 86.9% к 100 ppm формальдегида [38], а в качестве газочувствительного слоя были использованы слоистые наноструктуры MoS_2 , полученные сольвотермальным методом. Отклик к восстанавливающим газам при комнатной температуре может быть достигнут при использовании композитных газочувствительных слоев, например гетеропереходов MoS_2/CuO , демонстрирующих отклик к 100 ppm аммиака, равный 47% [39]. Однако при этом усложняется технология получения сенсорных слоев. В данной работе детектирование восстанавливающих газов при комнатной температуре проводили с измерением отклика при переменном напряжении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе гидротермальным методом получены газочувствительные слои на основе иерархических структур MoS_2 . С помощью спектроскопии импеданса продемонстрировано, что электрофизические свойства синтезированных слоев изменяются при взаимодействии с парами изопропилового спирта. При этом происходит уменьшение вещественной и мнимой составляющих импеданса, зависящее от частоты. Максимально достигнутые значения отклика составляют 3.82 (вещественная составляющая импеданса) и 4.34 (мнимая составляющая импеданса).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карманов А.А., Пронин И.А., Якушова Н.Д., Комолов А.С., Мошников В.А. Исследование поверхностных превращений в золь–гель-пленках на основе оксида цинка при ультрафиолетовом фотоотжиге методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Неорган. материалы. 2022. Т. 58. № 11. С. 1184–1191. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22110070>
2. Крестева Л.К., Димитров Д.П., Папазова К.И., Николаев Н.К., Пешикова Т.В., Мошников В.А., Грачева И.Е., Карпова С.С., Канева Н.В. Синтез и характеристика наноструктурированных слоев оксида цинка для сенсорики // ФТП. 2013. Т. 47. № 4. С. 564–569.
3. Кононова И.Е., Кононов П.В., Мошников В.А. Развитие модели образования материалов с иерархической структурой пор, созданных в условиях золь–гель-процессов // Неорган. материалы. 2018. Т. 54. № 5. С. 500–512.
4. Налимова С.С., Мякин С.В., Мошников В.А. Управление функциональным составом поверхности и улучшение газочувствительных свойств металлооксидных сенсоров посредством электронно-лучевой обработки // ФХС. 2016. Т. 42. № 6. С. 773–780.
5. Zhao J., Wang H., Cai Y., Zhao J., Gao Z., Song Y.-Y. The challenges and opportunities for TiO_2 nanostructures in gas sensing // ACS Sens. 2024. V. 9. № 4. P. 1644–1655. <https://doi.org/10.1021/acssensors.4c00137>
6. Shi Y., Li X., Sun X.F., Shao X., Wang H.Y. Strategies for improving the sensing performance of In_2O_3 -based gas sensors for ethanol detection // J. Alloys Compd. 2023. V. 963. P. 171190. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171190>
7. Рябко А.А., Бобков А.А., Налимова С.С., Максимов А.И., Левицкий В.С., Мошников В.А., Теруков Е.И. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержневой оксида цинка при комбинированной активации // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 5. С. 758–764. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21>
8. Krishna K.G., Parne S., Pothukanuri N., Kathirvelu V., Gandhi S., Joshi D. Nanostructured metal oxide semiconductor-based gas sensors: A comprehensive review // Sens. Actuators, A. 2022. V. 341. P. 113578. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113578>
9. Tian W., Liu X., Yu W. Research Progress of Gas Sensor Based on Graphene and Its Derivatives: A Review // Appl. Sci. 2018. V. 8. P. 1118. <https://doi.org/10.3390/app8071118>
10. Seekaew Y., Phokharatkul D., Wisitsoraat A., Wongchoosuk C. Highly sensitive and selective room-temperature NO_2 gas sensor based on bilayer transferred chemical vapor deposited graphene // Appl. Surf. Sci. 2017. V. 40. P. 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.286>

11. Buckley D.J., Black N.C.G., Castanon E.G., Melios C., Hardman M., Kazakova O. Frontiers of graphene and 2D material-based gas sensors for environmental monitoring // 2D Mater. 2020. V. 7. № 3. P. 032002. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab7bc5>
12. Wang Z., Bu M., Hu N., Zhao L. An overview on room-temperature chemiresistor gas sensors based on 2D materials: Research status and challenge // Composites, Part B. 2023. V. 248. P. 110378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110378>
13. Mihin A.O., Firsov D.D., Komkov O.S. Investigation of energy transitions in MoS₂ by photoreflectance spectroscopy method // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1695. P. 012111. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012111>
14. Kumar R., Zheng W., Liu X., Zhang J., Kumar M. MoS₂-Based Nanomaterials for Room-Temperature Gas Sensors // Adv. Mater. Technol. 2020. P. 1901062. <https://doi.org/10.1002/admt.201901062>
15. Sun J., Li X., Guo W., Zhao M., Fan X., Dong Y., Xu C., Deng J., Fu Y. Synthesis methods of two-dimensional MoS₂: a brief review // Crystals. 2017. V. 7. № 7. P. 198. <https://doi.org/10.3390/cryst7070198>
16. Lee S.-J., Son Y.-S., Choi J.-H., Kim S.-S., Park S.-Y. Morphology and catalytic performance of MoS₂ hydrothermally synthesized at various pH values // Catalysts. 2021. V. 11. № 10. P. 1229. <https://doi.org/10.3390/catal11101229>
17. Wei R., Yang H., Du K., Fu W., Tian Y., Yu Q., Liu S., Li M., Zou G. A facile method to prepare MoS₂ with nanoflower-like morphology // Mater. Chem. Phys. 2008. V. 108. P. 188–191. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.10.007>
18. Shokri A., Salami N. Gas sensor based on MoS₂ monolayer // Sens. Actuators, B. 2016. V. 236. P. 378–385. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.06.033>
19. Kumar R., Goel N., Kumar M. UV-Activated MoS₂ Based Fast and Reversible NO₂ Sensor at Room Temperature // ACS Sens. 2017. V. 2. № 11. P. 1744–1752. <https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00731>
20. Rajbhar M.K., De S., Sanyal G., Kumar A., Chakraborty B., Chatterjee S. Defect-engineered 3D nanostructured MoS₂ for detection of ammonia gas at room temperature // ACS Appl. Nano Mater. 2023. V. 6. № 7. P. 5284–5297. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c05361>
21. Ponnusamy K.M., Ghuge R.S., Raveendran N., Sathesh P.P., Durairaj S., Eswaran S.K., Heo K., Sivalingam Y., Chandramohan S. Vertical MoS₂ nanosheets via space-confined CVD for room temperature photo-enhanced highly selective triethylamine sensing // ACS Appl. Nano Mater. 2024. V. 7. № 6. P. 6691–6703. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c00697>
22. Liu H., Zhang S., Cheng Q., Wang L., Wang S. A mini review on the recent progress of MoS₂-based gas sensors // Catal. Lett. 2024. V. 154. № 4. P. 1375–1384. <http://doi.org/10.1007/s10562-023-04436-6>
23. Bobkov A., Luchinin V., Moshnikov V., Nalimova S., Spivak Y. Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors // Sensors. 2022. V. 22. № 4. P. 1530. <https://doi.org/10.3390/s22041530>
24. Kondratiev V.M., Vyacheslavova E.A., Shugabaev T., Kirilenko D.A., Kuznetsov A., Kadinskaya S.A., Shomakhov Z.V., Baranov A.I., Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Gudovskikh A.S., Bolshakov A.D. Si nanowire-based Schottky sensors for selective sensing of NH₃ and HCl via impedance spectroscopy // ACS Appl. Nano Mater. 2023. V. 6. № 13. P. 11513–11523. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01545>
25. Kondratiev V.M., Morozov I.A., Vyacheslavova E.A., Kirilenko D.A., Kuznetsov A., Kadinskaya S.A., Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Gudovskikh A.S., Bolshakov A.D. Silicon nanowire-based room-temperature multi-environment ammonia detection // ACS Appl. Nano Mater. 2022. V. 5. № 7. P. 9940–9949. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c02178>
26. Nalimova S.S., Kononova I.E., Moshnikov V.A., Dimitrov D.Tz., Kaneva N.V., Krasteva L.K., Syuleyman S.A., Bojinova A.S., Papazova K.I., Georgieva A.Ts. Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy // Bulg. Chem. Commun. 2017. V. 49. № 1. P. 121–126.
27. Balasubramani V., Sureshkumar S., Rao T.S., Sri-dhar T.M. Impedance spectroscopy-based reduced graphene oxide-incorporated ZnO composite sensor for H₂S investigations // ACS Omega. 2019. V. 4. № 6. P. 9976–9982. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00754>
28. Al-Hardan N.H., Abdullah M.J., Aziz A.A. Sensing mechanism of hydrogen gas sensor based on RF-sputtered ZnO thin films // Int. J. Hydrogen Energy. 2010. V. 35. P. 4428. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.006>
29. Fedorov F.S., Varezchnikov A.S., Kiselev I., Kolesnichenko V.V., Burmistrov I.N., Sommer M., Fuchs D., Kübel C., Gorokhovskiy A.V., Sysoev V.V. Potassium polytitanate gas-sensor study by impedance spectroscopy // Anal. Chim. Acta. 2015. V. 897. P. 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.09.029>
30. Du J., Wu H., Wang X., Qi C., Mao W., Ren T., Qiao Q., Yang Z. Ternary MoS₂/MoO₃/C nanosheets as high-performance anode materials for lithium-ion batteries // J. Electron. Mater. 2018. V. 47. № 11. P. 6767–6773. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6602-1>
31. Kundu M., Mondal D., Mondal I., Baral A., Halder P., Biswas S., Paul B.K., Bose N., Basu R., Das S. A rational preparation strategy of phase tuned MoO₃ nanostructures for high-performance all-solid asymmetric supercapacitor // J. Energy Chem. 2023. V. 87. P. 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.014>
32. Wang B.B., Zhong X.X., Ming B.M., Zhu M.K., Chen Y.A., Cvelbar U., Ostrikov K. Structure and pho-

- photoluminescence properties of MoO_{3-x} /graphene nanoflake hybrid nanomaterials formed via surface growth // *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 480. P. 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.183>
33. *Shankar P., Rayappan J.B.B.* Room temperature ethanol sensing properties of ZnO nanorods prepared using an electrospinning technique // *J. Mater. Chem. C*. 2017. V. 5. № 41. P. 10869–10880. <https://doi.org/10.1039/C7TC03771F>
 34. *Chiang H., Bhan A.* Catalytic consequences of hydroxyl group location on the rate and mechanism of parallel dehydration reactions of ethanol over acidic zeolites // *J. Catal.* 2010. V. 271. № 2. P. 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2010.01.021>
 35. *Piccini G., Alessio M., Sauer J.* Ab initio study of methanol and ethanol adsorption on Brønsted sites in zeolite H-MFI // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2018. V. 20. № 30. P. 19964–19970. <https://doi.org/10.1039/C8CP03632B>
 36. *Kumar R., Kulriya P.K., Mishra M., Singh F., Gupta G., Kumar M.* Highly selective and reversible NO_2 gas sensor using vertically aligned MoS_2 flake networks // *Nanotechnology*. 2018. V. 29. № 46. P. 464001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aade20>
 37. *Li W., Zhang Y., Long X., Cao J., Xin X., Guan X., Peng J., Zheng X.* Gas sensors based on mechanically exfoliated MoS_2 nanosheets for Room-Temperature NO_2 detection // *Sensors*. 2019. V. 19. № 9. P. 2123. <https://doi.org/10.3390/s19092123>
 38. *Choi G.J., Mishra R.K., Gwag J.S.* 2D layered MoS_2 based gas sensor for indoor pollutant formaldehyde gas sensing applications // *Mater. Lett.* 2020. V. 264. P. 127385. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127385>
 39. *Sharma S., Kumar A., Singh N., Kaur D.* Excellent room temperature ammonia gas sensing properties of n- MoS_2 /p-CuO heterojunction nanoworms // *Sens. Actuators, B*. 2018. V. 275. P. 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.08.046>