

СИНТЕЗ И ДИАГНОСТИКА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ МОЛИБДЕНА

С.С. Налимова¹, З.В. Шомахов², А.Д. Чупрова¹, А.М. Гукетлов²

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5 лит. Ф

²ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
sskarpova@list.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.1009

Аннотация: В последние годы активно исследуются различные дихалькогениды переходных металлов, которые представляют интерес для множества областей применений, в том числе газовых сенсоров. В данной работе газочувствительные наноструктуры на основе дисульфида молибдена и оксида молибдена получены гидротермальным методом. Химический состав поверхности полученных образцов исследован с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Проанализированы газочувствительные свойства синтезированных структур к парам изопропилового спирта и ацетона при вариации температуры детектирования. Показано, что в результате термообработки при 150°C происходит частичное окисление дисульфида молибдена. Отжиг образцов MoS_2 при 400°C приводит к полному окислению до MoO_3 . Анализ газочувствительных свойств структур показал, что максимальный отклик к парам изопропилового спирта и ацетона имеет оксид молибдена во всем исследуемом температурном диапазоне. Как дисульфид молибдена, так и оксид молибдена показывают лучший отклик к парам изопропилового спирта по сравнению с ацетоном.

Ключевые слова: хемосорбционные газовые сенсоры, дисульфид молибдена, оксид молибдена, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

1. Введение

Летучие органические соединения, выбрасываемые в атмосферу в результате промышленного производства, представляют угрозу для окружающей среды и здоровья человека. Среди них изопропиловый спирт C_3H_8O , применяемый в медицинской, химической и прочих отраслях промышленности, оказывает наркотическое и токсичное действие на человека. На производствах, где он используется, необходим постоянный мониторинг содержания изопропилового спирта. На практике используется множество принципиально разных методов газового детектирования, в основе которых лежат фундаментальные зависимости свойств чувствительных элементов сенсоров от состава окружающей их газовой среды [1]. Наибольший интерес представляют собой сенсоры, меняющие в присутствии окисляющих или восстанавливающих газов свои электрофизические свойства, например, сопротивление [2-6]. Важной технической задачей является развитие надёжных, технологичных и

относительно дешёвых сенсоров и обеспечение их работоспособности в реальных условиях.

Среди газочувствительных материалов MoO_3 , двумерный оксид переходного металла, представляет большой интерес, так как он является широкозонным, имеет слоистую структуру и высокую каталитическую активность. Иерархические наноструктуры MoO_3 , синтезированные гидротермальным методом, проявляют высокую чувствительность к триэтиламину в диапазоне концентрации 125-50 мд при 240°C с минимальным пределом обнаружения 0,1 мд [7]. Нанопластинки MoO_3 , полученные методом жидкофазного отшелушивания, демонстрируют высокую чувствительность к H_2S (75-10 мд) при 300°C [8].

Халькогениды переходных металлов привлекают большое внимание из-за слоистой структуры и множества возможных областей применения. Дисульфид молибдена является одним из типичных аналогов графена. Дисульфид молибдена обладает уникальной многослойной молекулярной структурой, а также отличается хорошей электропроводностью, большой удельной поверхностью, хорошей стабильностью, высокой адсорбционной способностью [9, 10]. Однако в ранее представленных работах сенсоры на основе MoS_2 демонстрируют низкий отклик и большое время восстановления. В работе [11] относительный отклик при концентрации NO_2 5 мд и рабочей температуре 60°C составляет 18,1% (0,18 отн.ед.), время восстановления равняется 172 с. В работе [12] время восстановления составило 310 с при рабочей температуре 100°C с концентраций 100 мд NO_2 , а относительный отклик – 21,6% (0,22 отн. ед.).

2. Синтез и исследование химического состава наноструктур

С помощью гидротермального метода был проведен синтез нанопорошка дисульфида молибдена. Гидротермальный синтез наночастиц является универсальным методом, поскольку с его помощью можно получить широкий спектр наночастиц, от оксидов металлов до квантовых точек, нанотрубок и некоторых других неорганических соединений [13, 14]. Образец MoS_2 был синтезирован с использованием $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, $SC(NH_2)_2$, $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ и дистиллированной воды в качестве исходных компонентов. Процесс синтеза был следующим: 0,966 г $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$, 1,143 г $SC(NH_2)_2$ и 0,0952 г $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ растворяли в 40 мл дистиллированной воды. Раствор помещали в автоклав и выдерживали при температуре 200 °C в течение 14 часов. После этого автоклав охлаждали до комнатной температуры естественным путем. Образовавшиеся продукты собирали центрифугированием и промывали дистиллированной водой

несколько раз до достижения нейтрального pH . Полученный порошок диспергировали в спирте и наносили на подготовленные керамические подложки с золотыми электродами методом spin-coating. Готовые образцы прогревали при 150°C в течение 30 минут. Полученные газочувствительные слои отжигали при 400°C в течение 2 часов, в результате чего образец окислялся до MoO_3 . Также были получены образцы, отожженные при температуре 200°C в течение 30 минут. Для получения информации о составе и химических состояниях атомов в полученных образцах был проведен анализ спектров синтезированных материалов с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре K-Alpha, (Thermo Scientific, США).

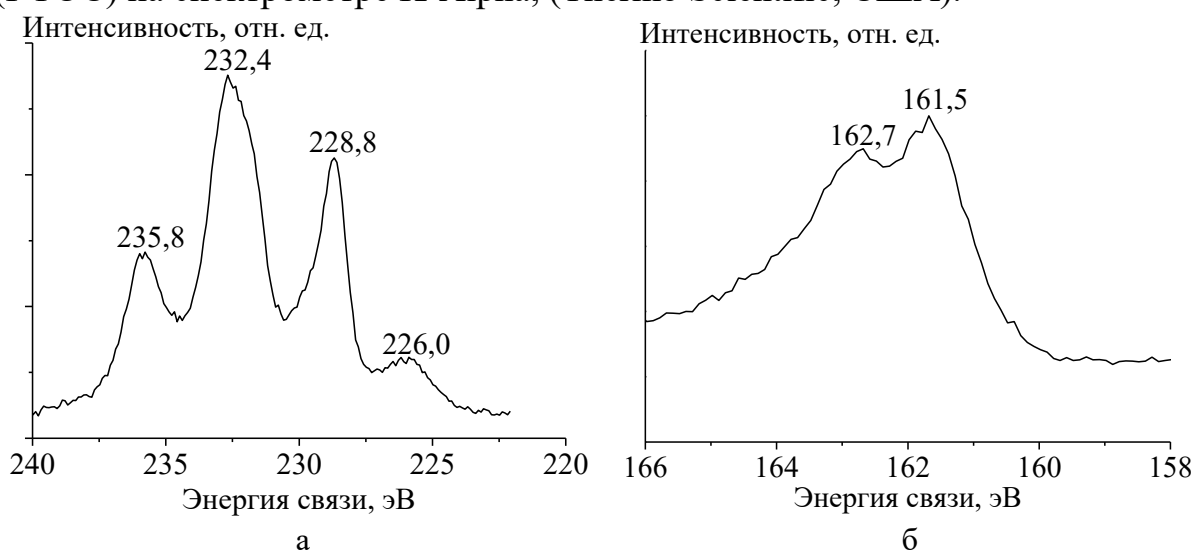


Рис. 1. РФЭС спектр дисульфида молибдена: а – уровень $\text{Mo}3d$; б – уровень $\text{S}2p$.

На рис. 1 а показан спектр уровня $\text{Mo}3d$ образца дисульфида молибдена после термообработки при 150°C . На нем наблюдается несколько пиков, соответствующих молибдену с разными степенями окисления. Были выделены составляющие, наблюдаемые при энергиях связи 228,8 эВ ($\text{Mo}3d_{5/2}$) и 232,4 эВ ($\text{Mo}3d_{5/2}$), характерные для молибдена со степенью окисления $4+$, а также при 232,4 эВ ($\text{Mo}3d_{3/2}$) и 235,8 эВ ($\text{Mo}3d_{3/2}$), отвечающие молибдену со степенью окисления $6+$. На спектре наблюдается пик с энергией связи 226 эВ, соответствующий сере, из-за перекрытия диапазона энергий связи уровней $\text{Mo}3d$ и $\text{S}2s$. Положения пиков на спектре, указывающих на присутствие Mo^{4+} , характерны для соединения MoS_2 ; о присутствии Mo^{6+} – для оксида молибдена MoO_3 . На спектре уровня серы $\text{S}2p$ (см. рис. 1 б) обнаружено присутствие двух пиков с энергиями связи 161,5 эВ ($\text{S}2p_{3/2}$) и 162,7 эВ ($\text{S}2p_{1/2}$), положение которых соответствует соединению MoS_2 [15].

Результаты исследования образца оксида молибдена, полученного

окислением исходного MoS_2 при $400^\circ C$, представлены на рис. 2. На спектре уровня $Mo3d$ наблюдаются пики при энергиях связи 233 эВ ($Mo3d_{5/2}$) и 236,1 эВ ($Mo3d_{3/2}$), соответствующих степени окисления Mo^{6+} в полностью окисленном MoO_3 [15]. Спектр уровня $O1s$ содержит пик с энергией связи 530,8 эВ, соответствующий кислороду кристаллической решетки в соединении MoO_3 . Также наблюдается пик при 532,8 эВ, свидетельствующий о наличии адсорбированного кислорода [16].

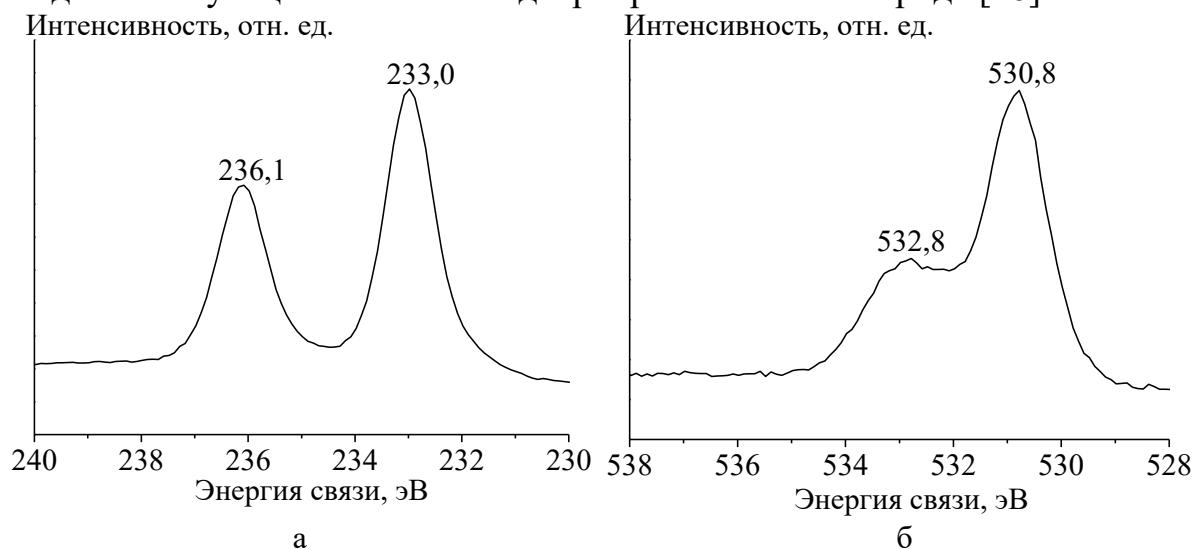


Рис. 2.1 РФЭ спектр оксида молибдена: а – уровень $Mo3d$; б – уровень $O1s$.

3. Диагностика газочувствительных свойств соединений молибдена

Исследование сенсорных свойств синтезированных наноструктур проводились на специальном стенде [17, 18]. Установка позволяет отслеживать изменение сопротивления образца при подаче воздуха и газа-реагента. Образец помещается в камеру, в которую подается детектируемый газ. Ротаметрами задается концентрация целевого газа. Газом-реагентом выступали пары изопропилового спирта с концентрацией 1000 мд. Для выявления селективности использовались пары ацетона с концентрацией 1500 мд. Отклик сенсора к газу-реагенту определяют как отношение сопротивления структуры при подаче воздуха R_{air} и ее сопротивления при подаче газа R_{gas} : $S = R_{air}/R_{gas}$. Времена отклика t_{resp} и восстановления t_{rec} определяют как интервалы времени, необходимые датчику для достижения 90% от общего изменения сопротивления во время адсорбции и десорбции газа соответственно. В Таблице 1 приведены результаты измерений при детектировании паров изопропилового спирта при концентрации 1000 мд при разных условиях нагрева для образцов, отожженных при $400^\circ C$ и $200^\circ C$. Большим откликом обладает образец, отожженный при более высокой температуре. По результатам измерений

при разных концентрациях изопропилового спирта при температуре 200°C (см. Таблицу 2) можно наблюдать рост скорости отклика и увеличение чувствительности с повышением концентрации.

Таблица 1. Результаты измерений сенсорных свойств при разных условиях нагрева (детектируемый газ – пары изопропилового спирта, концентрация газа – 1000 мд).

Образец	MoO_3			MoS_2	
	150	200	250	150	200
Температура, °C	150	200	250	150	200
S , отн. ед.	2,25	3,64	5,25	1,68	2,29
t_{resp} , с / t_{rec} , с	290 / 400	237 / 415	370 / 355	360 / 240	200 / 280

Таблица 2. Результаты измерений сенсорных свойств MoO_3 при разных концентрациях паров изопропилового спирта (детектируемый газ – пары изопропилового спирта).

Концентрация газа, мд	400	600	1000
Температура, °C	200	200	200
S , отн. ед.	2,63	3,26	5,71
t_{resp} , с / t_{rec} , с	320 / 490	310 / 480	120 / 500

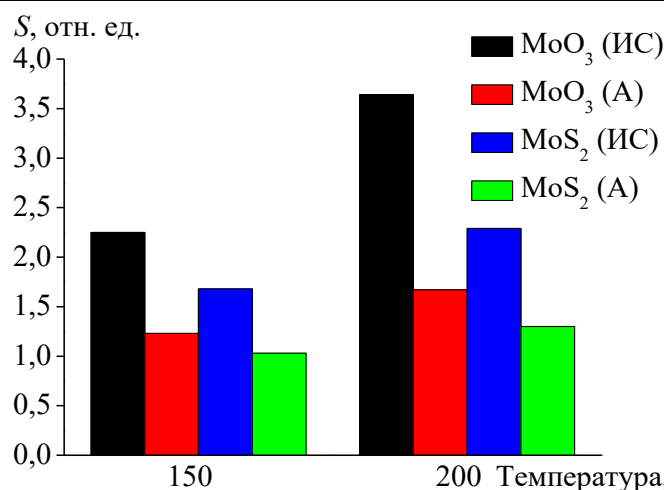


Рис. 3. Отклики образцов к парам изопропилового спирта (ИС, 1000 мд) и ацетона (А, 1500 мд).

При исследовании селективности датчики подвергались воздействию тестируемых газов: изопропилового спирта с концентрацией 1000 мд и ацетона с концентрацией 1500 мд. Образцы показывают больший отклик к парам изопропилового спирта при концентрации ниже концентрации ацетона на 500 мд (см. рис. 3). При температуре 200°C отклик к изопропиловому спирту больше в 2 раза.

5. Заключение

Разработаны технологические режимы синтеза дисульфида молибдена и оксида молибдена. Исследование состава поверхности синтезированных образцов дисульфида молибдена и оксида молибдена с

помощью РФЭС показало, что при температуре 400°C происходит полное окисление с образованием MoO_3 . В результате гидротермального синтеза формируются наночастицы, представляющие собой дисульфид молибдена с незначительным содержанием оксида молибдена вследствие окисления при 150°C. Отклик чувствительного слоя к изопропиловому спирту увеличивался при повышении рабочей температуры от 150°C до 250°C. Была получена близкая к линейной зависимость отклика к изопропиловому спирту при увеличении его концентрации.

Библиографический список:

1. **Dhall, S.** A review on environmental gas sensors: Materials and technologies / S. Dhall, B.R. Mehta, A.K. Tyagi, K. Sood // *Sensors International*. – 2021. – V. 2. – Art. № 100116. – 10 p. DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100116.
2. **Bobkov, A.A.** Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature / A.A. Bobkov, D.S. Mazing, A.A. Ryabko et al. // *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics*, 22-23 October 2018, Saint Petersburg. – 2018. – P. 219-221. DOI: 10.1109/EEExPolytech.2018.8564407.
3. **Bobkov, A.** Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors / A. Bobkov, V. Luchinin, V. Moshnikov, S. Nalimova, Y. Spivak // *Sensors*. – 2022.–V. 22.–I. 4. – Art. № 1530. – 14 p. DOI: 10.3390/s22041530.
4. **Moshnikov, V.A.** Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors / V.A. Moshnikov, I.E. Gracheva, V.V. Kuznezov et al. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2010. – V. 356. – I. 37-40. – P. 2020-2025. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.030.
5. **Налимова, С.С.** Управление функциональным составом поверхности и улучшение газочувствительных свойств металлооксидных сенсоров посредством электронно-лучевой обработки / С.С. Налимова, С.В. Мякин, В.А. Мошников // *Физика и химия стекла*. – 2016. – Т. 42. – № 6. – С. 773-780.
6. **Мошников, В.А.** Газочувствительные слои на основе фрактально-перколяционных структур / В.А. Мошников, С.С. Налимова, Б.И. Селезнев // *Физика и техника полупроводников*. – 2014. – Т. 48. – № 11. – С. 1535-1539.
7. **Hou, X.** Enhanced triethylamine-sensing properties of hierarchical molybdenum trioxide nanostructures derived by oxidizing molybdenum disulfide nanosheets / X. Hou, Y. Gao, H. Ji et al. // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2022. – V. 605. – P. 624-636. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.07.053.
8. **Bao, J.** H₂S sensor based on two-dimensional MoO₃ nanoflakes: Transition between sulfidation and oxidation / J. Bao, Z. Zhang, Y. Zheng // *Sensors and Actuators B*. – 2021. – V. 345. – Art. № 130408. – 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130408.
9. **Singh, S.** Room temperature high performance ammonia sensor using MoS₂/SnO₂ nanocomposite / S. Singh, S. Kumar, S. Sharma // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – V. 28. – Part 1. – P. 52-55. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.208.
10. **Wang, F.** Hierarchical composites of MoS₂ nanoflower anchored on SnO₂ nanofiber for methane sensing / F. Wang, H. Liu, K. Hu et al. // *Ceramics International*. – 2019. – V. 45. – I. 17. – Part 1. – P. 22981-22986. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.07.342.
11. **Kumar, R.** High performance NO₂ sensor using MoS₂ nanowires network / R. Kumar, N. Goel, M. Kumar // *Applied Physics Letters*. – 2018. – V. 112. – I. 5. – Art. № 053502. – 5 p. DOI: 10.1063/1.5019296.
12. **Kumar, R.** UV-activated MoS₂ based fast and reversible NO₂ sensor at room temperature / R. Kumar, N. Goel, M. Kumar // *ACS Sensors*. – 2017. – V. 2. – I. 11. – P. 1744-1752. DOI: 10.1021/acssensors.7b00731.
13. **Налимова, С.С.** Синтез и исследование газочувствительных наноструктур системы Zn-Sn-O / С.С. Налимова, З.В. Шомахов, К.Н. Пунегова, А.А. Рябко, А.И. Максимов // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 910-918. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.910.
14. **Бобков, А.А.** Получение гетероструктурных оксидных композиций для перспективных солнечных элементов нового поколения / А.А. Бобков, Н.А. Лашкова, А.И. Максимов и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 2017. – Т. 51. – № 1. – С. 63-67.

15. Chamlagain, B. Electrical properties tunability of large area MoS₂ thin films by oxygen plasma treatment / B. Chamlagain, S. I. Khondaker // *Applied Physics Letters*. – 2020. – V. 116. – I. 22. – Art. № 223102. – 5 p. DOI: 10.1063/5.0008850.
16. Torres, J. XPS and X-ray diffraction characterization of MoO₃ thin films prepared by laser evaporation / J. Torres, J.E Alfonso, L.D. López-Carreño // *Physica Status Solidi C*. – 2005. – V. 2. – I. 10. – P. 3726-3729. DOI: 10.1002/pssc.200461782.
17. Рябко, А.А. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации / А.А. Рябко, А.А. Бобков, С.С. Налимова и др. // *Журнал технической физики*. – 2022. – Т. 92. – Вып. 5. – С. 758-764. DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21.
18. Nalimova, S.S. Light-activation of gas sensitive layers based on zinc oxide nanowires / S.S. Nalimova, A.A. Ryabko, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1697. – Art. № 012128. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012128.

References:

1. Dhall S., Mehta B.R., Tyagi A.K., Sood K. A review on environmental gas sensors: Materials and technologies, *Sensors International*, 2021, vol. 2, art. no. 100116, 10 p. DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100116.
2. Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A. et al. Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics. Proceedings*, 22-23 October 2018, Saint Petersburg, 2018, pp. 219-221. DOI: 10.1109/EEExpolytech.2018.8564407.
3. 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, vol. 22, issue 4, art. no. 1530, 14 p. DOI: 10.3390/s22041530.
4. Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Kuznezov V.V. et al. Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, vol. 356, issue 37-40, pp. 2020-2025. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.030.
5. Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Myakin S.V. Controlling surface functional composition and improving the gas-sensing properties of metal oxide sensors by electron beam processing, *Glass Physics and Chemistry*, 2016, vol. 42, issue 6, pp. 597-601. DOI: 10.1134/S1087659616060171.
6. Moshnikov, V.A. Nalimova S.S., Seleznev B.I. Gas-sensitive layers based on fractal-percolation structures, *Semiconductors*, 2014, vol. 48, issue 11, pp. 1499-1503. DOI: 10.1134/S1063782614110177.
7. Hou X., Gao Y., Ji H. et al. Enhanced triethylamine-sensing properties of hierarchical molybdenum trioxide nanostructures derived by oxidizing molybdenum disulfide nanosheets, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, vol. 605, pp. 624-636. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.07.053.
8. Bao J., Zhang Z., Zheng Y. H₂S sensor based on two-dimensional MoO₃ nanoflakes: Transition between sulfidation and oxidation, *Sensors and Actuators B*, 2021, vol. 345, art. no. 130408, 10 p. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130408.
9. Singh S., Kumar S., Sharma S. Room temperature high performance ammonia sensor using MoS₂/SnO₂ nanocomposite, *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 28, part 1, pp. 52-55. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.208.
10. Wang F., Liu H., Hu K. et al. Hierarchical composites of MoS₂ nanoflower anchored on SnO₂ nanofiber for methane sensing, *Ceramics International*, 2019, vol. 45, issue 17, part 1, pp. 22981-22986. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.07.342.
11. Kumar R., Goel N., Kumar M. High performance NO₂ sensor using MoS₂ nanowires network, *Applied Physics Letters*, 2018, vol. 112, issue 5, art. no. 053502, 5 p. DOI: 10.1063/1.5019296.
12. Kumar R., Goel N., Kumar M. UV-activated MoS₂ based fast and reversible NO₂ sensor at room temperature, *ACS Sensors*, 2017, vol. 2, issue 11, pp. 1744-1752. DOI: 10.1021/acssensors.7b00731.
13. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Punegova K.N., Ryabko A.A., Maximov A.I. Sintez i issledovanie gazochuvstvitel'nykh nanostruktur sistemy Zn-Sn-O [Synthesis and study of gas-sensitive nanostructures of the Zn-Sn-O system], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 910-918. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.910. (In Russian).
14. Bobkov A.A., Lashkova N.A., Maximov A.I. et al. Fabrication of oxide heterostructures for promising solar cells of a new generation, *Semiconductors*, 2017, vol. 51, issue 1, pp. 61-65. DOI: 10.1134/S1063782617010031.
15. Chamlagain B., Khondaker S.I. Electrical properties tunability of large area MoS₂ thin films by oxygen plasma treatment, *Applied Physics Letters*, 2020, vol. 116, issue 22, art. no. 223102, 5 p. DOI:

10.1063/5.0008850.

16. Torres J., Alfonso J.E., López-Carreño L.D. XPS and X-ray diffraction characterization of MoO₃ thin films prepared by laser evaporation, *Physica Status Solidi C*, 2005, vol. 2, issue 10, pp. 3726-3729. DOI: 10.1002/pssc.200461782.

17. Ryabko A.A., Bobkov A.A., Nalimova S.S. et al. Gas sensitivity of nanostructured coatings based on zinc oxide nanorods under combined activation, *Technical Physics*, 2022, vol. 67, issue 5, pp. 644-649. DOI: 10.21883/TP.2022.05.53683.314-21.

18. Nalimova S.S., Ryabko A.A., Maximov A.I., Moshnikov V.A. Light-activation of gas sensitive layers based on zinc oxide nanowires, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697, art. no. 012128, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012128.

Short Communication

SYNTHESIS AND DIAGNOSTICS OF GAS-SENSITIVE NANOSTRUCTURES BASED ON MOLYBDENUM COMPOUNDS

S.S. Nalimova¹, Z.V. Shomakhov², A.D. Chuprova¹, A.M. Guketlov²

¹*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia*

²*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.1009

Abstract: In recent years, various transition metal dichalcogenides have been widely investigated, which are of interest for many applications, including gas sensors. In this work, some gas-sensitive nanostructures based on molybdenum disulfide and molybdenum oxide were synthesized by hydrothermal method. The surface chemical composition of the samples was studied by X-ray photoelectron spectroscopy. The gas-sensitive properties of the synthesized structures to isopropyl alcohol and acetone vapors at different working temperatures were analyzed. It was shown that as a result of heat treatment at 150°C, partial oxidation of molybdenum disulfide occurred. Annealing of MoS₂ samples at 400°C led to complete oxidation to MoO₃. Analysis of the gas-sensitive properties of the structures showed that molybdenum oxide has the maximum response to isopropyl alcohol and acetone vapors in the entire temperature range under study. Both molybdenum disulfide and molybdenum oxide show a better response to isopropyl alcohol vapors compared to acetone vapors.

Keywords: chemisorption gas sensors, molybdenum disulfide, molybdenum oxide, X-ray photoelectron spectroscopy.

Налимова Светлана Сергеевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Шомахов Замир Валериевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Чупрова Александра Денисовна – студент 4 курса кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Гукетлов Аслан Мухамедович – студент 1 курса магистратуры Института информатики, электроники и робототехники ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Svetlana S. Nalimova – Ph. D., Docent, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Zamir V. Shomakhov – Ph. D., Docent, Department of Electronics and Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University

Alexandra D. Chuprova – 4th year student, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Aslan M. Guketlov – 1st year graduate student, Institute of Informatics, Electronics and Robotics, Kabardino-Balkarian State University

Поступила в редакцию/received: 06.09.2023; после рецензирования/ revised: 10.10.2023; принята/accepted: 12.10.2023.