

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 538.935, 53.087.92

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146

**ХАЛЬКОГЕНИДЫ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ  
В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ\***

В.А. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, А.А. ФЕДОРОВ<sup>2</sup>, М.А. НАБЕРУХИН<sup>3</sup>,  
А.С. БЕРДИНСКИЙ<sup>4</sup>, П.А. ПОЛТАРАК<sup>5</sup>, В.Е. ФЕДОРОВ<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 3, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, инженер I категории лаборатории физики низких температур. E-mail: vitalii.a.kuznetsov@gmail.com

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: andrew.fedorov\_1999@mail.ru

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: mihailenaberukhin@gmail.com

<sup>4</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники. E-mail: berdinsky.alexander@gmail.com

<sup>5</sup> 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 3, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, младший научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов. E-mail: poltarak@niic.nsc.ru

<sup>6</sup> 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 3, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов. E-mail: fed@niic.nsc.ru

На сегодняшний день для измерения в окружающей среде концентрации газов различной природы широко используются датчики с чувствительными резистивными элементами на основе полупроводниковых оксидов металлов. Одной из основных проблем их использования является необходимость нагрева чувствительного элемента до высоких температур. В связи с этим ведется большое количество научно-исследовательских работ по поиску новых материалов и модификации уже имеющихся. К числу материалов, привлекающих большой интерес в данной области, относятся халькогениды переходных металлов. В данной работе изучаются монокристаллические ди- и трихалькогениды переходных металлов в качестве чувствительных элементов сенсоров на летучие органические вещества. Показано, что образцы в зависимости от их природы при комнат-

---

\* Статья получена 07 ноября 2018 г.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-13-00674).

ной температуре проявляют либо положительный, либо отрицательный отклик на присутствие в атмосфере газа восстановительной природы, этанола, т. е. электросопротивление образцов либо увеличивается либо уменьшается соответственно.

**Ключевые слова:** газовый сенсор, халькогениды переходных металлов (ХПМ), электронный транспорт

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения атмосферы в среде обитания человека, контроля состава атмосферы в технологических процессах, добычи угля в шахтах является на сегодняшний день важной задачей. Для решения таких задач на сегодняшний день разработан ряд методов с различными типами чувствительных элементов. Так, для детектирования различных токсичных веществ используются полупроводниковые, термокаталитические, термокондуктометрические датчики, электрохимические сенсоры, а также оптические и ИК-спектральные методы [1–5].

Одними из наиболее распространенных являются датчики на основе полупроводниковых чувствительных элементов, принцип работы которых заключается в изменении электросопротивления полупроводникового материала при адсорбции на его поверхности молекул детектируемых газов – газов восстановителей или окислителей. К одной из главных проблем использования полупроводниковых чувствительных элементов в таких датчиках можно отнести необходимость нагрева чувствительного материала до температур от 100 до 800 °С [3]. Так, например, классический полупроводниковый газовый сенсор на основе оксида олова работает при температуре более 250 °С [5]. На сегодняшний день на практике используется широкий ряд полупроводниковых оксидов (например,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  для детектирования газов восстановительной природы и  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  для газов-окислителей) [2].

Как было сказано выше, одна из проблем резистивных газовых сенсоров – высокие рабочие температуры, и в настоящий момент ведутся работы по поиску новых материалов, способных проявлять газовую чувствительность при комнатной температуре. Другой проблемой является селективность полупроводниковых сенсоров к газам различной природы – чувствительность резистивных полупроводниковых газовых сенсоров может быть одинаковой к воздействию различных газов. В последнее время в поиске путей решения данных проблем интерес большого количества исследователей привлекают халькогениды переходных металлов (ХПМ) и графен в качестве сенсоров летучих органических веществ (ЛОВ) [6–16]. Так, была продемонстрирована возможность использования ХПМ при комнатной температуре и селективность, достигнутая путем декорирования поверхности ХПМ частицами благородных металлов [10, 17, 18].

Данная работа направлена на поиск новых материалов, которые могут быть использованы в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров при комнатной температуре. В работе приведены результаты экспериментального исследования чувствительности ряда монокристаллических образцов ХПМ к этанолу как к одному из представителей газов восстановительной природы.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве экспериментальных образцов использованы монокристаллические образцы  $\text{TiSe}_2$ ,  $\text{TiS}_3$ ,  $\text{NbTe}_2$ . Монокристаллы  $\text{TiSe}_2$ ,  $\text{TiS}_3$ ,  $\text{NbTe}_2$  были синтезированы из простых веществ методом высокотемпературного ампульного синтеза. Навески исходных реагентов (233 мг титана и 767 мг селена для  $\text{TiSe}_2$ ; 332 мг титана и 668 мг серы для  $\text{TiS}_3$ ; 267 мг ниобия и 733 мг теллура для  $\text{NbTe}_2$ ) были помещены в кварцевые ампулы объемом 80 мл. Ампулы были заполнены аргоном, затем в каждую был добавлен йод в качестве транспортного агента в количестве 30 мг. Ампулы были охлаждены в жидком азоте, вакуумированы и герметизированы. Далее их поместили в печь на 150 ч при температурах 800, 500 и 840 °C для  $\text{TiSe}_2$ ,  $\text{TiS}_3$  и  $\text{NbTe}_2$  соответственно. После охлаждения ампулы вскрывали и вручную отбирали кристаллы для измерений. Размеры кристаллов, полученных таким образом, составляли до 2–3 мм в наибольшем направлении.

Исследование влияния газа этанола проводилось при комнатной температуре в измерительной камере, состоящей из двух отделений: первое наполнялось воздухом при атмосферном давлении; второе наполнялось воздухом с этанолом, парциальное давление этанола было ниже насыщенного пара, концентрация порядка 10 000 м.д. Образцы подвергались воздействию атмосферы этанола в течение 20...30 мин и затем выдерживались на воздухе в течение 20...30 мин. Эксперименты проводились при комнатной температуре, образцы в течение всех экспериментов также находились при комнатной температуре. Эксперимент повторялся несколько раз.

Для измерения электросопротивления образцов использовался четырехконтактный метод. Сначала подготавливалась измерительная плата с четырьмя контактными дорожками с низкотемпературным припоем. Затем образцы размерами 1–2 мм в наибольшем направлении отбирались вручную из синтезированной массы образцов и впаивались в платы при температуре ниже 120 °C. Для измерения падения напряжения на потенциальных контактах образцов и образцовых катушек сопротивления (для измерения тока в цепи) использовался прецизионный мультиметр Keithley 2000. Для каждого образца измерялась вольт-амперная характеристика, при этом мощность, выделяемая на образцах во время проведения экспериментов, не приводила к их разогреву.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1–3 приведены временные зависимости электросопротивления экспериментальных образцов в присутствии этанола. Из полученных зависимостей видно, что на образцы различной природы газ-восстановитель (этанол) воздействует различным образом, электросопротивление одних уменьшается, других – увеличивается. На зависимостях видно, что электросопротивление не во всех случаях возвращается к исходному значению и возвращается с разной скоростью. Это может быть связано с различной природой адсорбционных центров и, как следствие, с различными скоростями адсорбции и десорбции молекул газа.

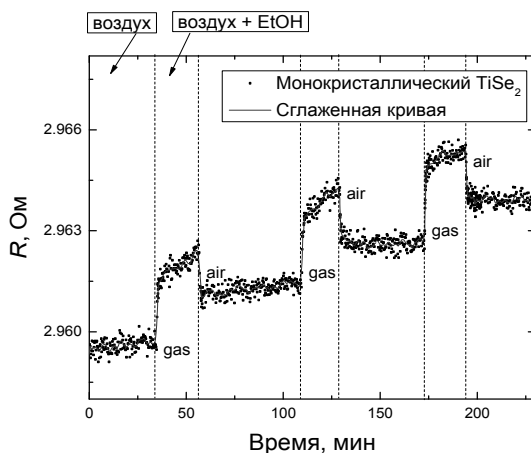


Рис. 1. Изменение электросопротивления монокристаллического образца  $\text{TiSe}_2$  в газовой атмосфере этанола

Для исследованных образцов были измерены температурные зависимости электросопротивления. На основании характера полученных зависимостей и литературных данных было установлено, что  $\text{TiSe}_2$  при комнатных температурах в качестве основных носителей заряда имеет дырки, объемный монокристаллический образец  $\text{TiS}_3$  является полупроводником  $n$ -типа, а  $\text{NbTe}_2$  – полуметаллом. Различный по знаку отклик электросопротивления образцов на этанол, газ восстановительной природы, может быть объяснен различным типом носителей заряда в образцах. Так, электросопротивление образца  $\text{TiSe}_2$  увеличивается при воздействии газа восстановительной природы, т. е. концентрация основных носителей заряда, дырок, уменьшается. Для полупроводникового образца  $\text{TiS}_3$   $n$ -типа наблюдается уменьшение электросопротивле-

ния, т. е. воздействие газа восстановительной природы увеличивает концентрацию основных носителей – электронов. В случае полуметаллического образца  $\text{NbTe}_2$  электросопротивление уменьшается, что свидетельствует о том, что концентрация электронов в образце выше концентрации дырок, и газ-восстановитель увеличивает эту концентрацию.

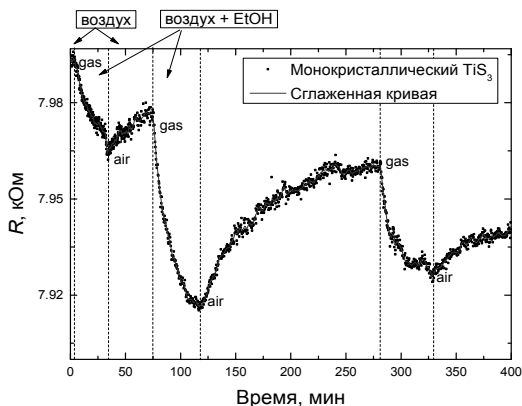


Рис. 2. Изменение электросопротивления монокристаллического образца  $\text{TiS}_3$  в газовой атмосфере этанола

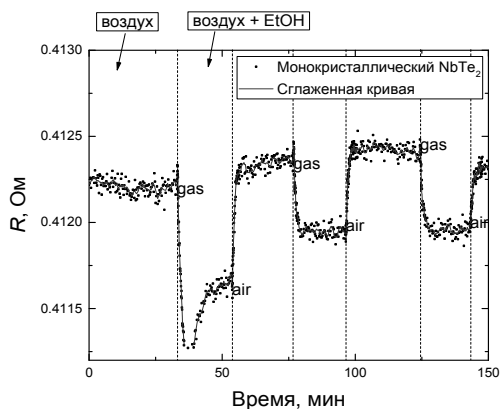


Рис. 3. Изменение электросопротивления монокристаллического образца  $\text{NbTe}_2$  в газовой атмосфере этанола

Следует отметить, что экспериментальные образцы проявляют газосенсорные свойства при комнатной температуре, что является одной из важнейших задач поиска новых материалов для газовых сенсоров резистивного типа. Нами ранее было показано, что поликристаллические образцы ХПМ также проявляют чувствительность к газам [19]. Можно заключить, что одной из причин изменения электросопротивления поликристаллических образцов является изменение электросопротивления отдельных кристаллитов. Поскольку размеры экспериментальных монокристаллических образцов были достаточно большие (единицы микрометров толщины и сотни микрометров длины), то следует ожидать, что уменьшение их размеров приведет к значительному увеличению газовой чувствительности, поскольку увеличится отношение поверхности к объему, и изменение электросопротивления приповерхностного слоя будет приводить к значительно большему изменению полного сопротивления образцов. То есть для создания газосенсорных элементов на основе поликристаллических халькогенидов переходных металлов следует применять материалы с малым размером частиц. Наиболее эффективным методом получения частиц ХПМ малого (вплоть до нанометрового) размера является жидкофазное расщепление в полярных растворителях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на примере монокристаллических халькогенидов переходных металлов  $\text{TiSe}_2$ ,  $\text{TiS}_3$ ,  $\text{NbTe}_2$  показано, что данный класс веществ может быть использован в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров, работающих при комнатной температуре. Для достижения большей газовой чувствительности в поликристаллических образцах на основе данных соединений необходимым является уменьшение размеров кристаллитов. Полученные данные позволяют определить дальнейшее направление исследования данных материалов как с научной точки зрения, так и с практической.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fraden J.* Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. – 5th ed. – Cham [et al.]: Springer International Publishing Switzerland, 2016.
2. *Korotcenkov G.* Handbook of gas sensor materials. Vol. 1. Conventional approaches. – New York: Springer, 2013. – 442 p.
3. *Korotcenkov G.* Handbook of gas sensor materials. Vol. 2. New trends and technologies. – New York: Springer, 2014. – 454 p.

4. *Soloman S.* Sensors handbook. – 2nd ed. – New York [et al.]: McGraw-Hill, 2010. – 1385 p.
5. Modern sensors handbook / ed. by P. Ripka, A. Tipek. – London: ISTE Ltd, 2007.
6. Determination of the electrical behaviour of surfactant treated polymer/carbon black composite gas sensors / K. Arshak, E. Moore, L. Cavanagh, J. Harris, B. McConigly, C. Cuniff, G. Lyons, S. Clifford // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2005. – Vol. 36 (4). – P. 487–491. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.10.015.
7. *Bondavalli P., Legagneux P., Pribat D.* Carbon nanotubes based transistors as gas sensors: state of the art and critical review // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2009. – Vol. 140 (1). – P. 304–318. – DOI: 10.1016/j.snb.2009.04.025.
8. Two-dimensional layered nanomaterials for gas-sensing applications / W. Yang, L. Gan, H. Li, T. Zhai // *Inorganic Chemistry Frontiers*. – 2016. – Vol. 3. – P. 433–451. – DOI: 10.1039/C5QI00251F.
9. Tunable volatile-organic-compound sensor by using au nanoparticle incorporation on MoS<sub>2</sub> / S.-Y. Cho, H.-J. Koh, H.-W. Yoo, J.-S. Kim, H.-T. Jung // *ACS Sensors*. – 2017. – Vol. 2 (1). – P. 183–189. – DOI: 10.1021/acssensors.6b00801.
10. MoS<sub>2</sub> nanosheet–Pd nanoparticle composite for highly sensitive room temperature detection of hydrogen / C. Kuru, C. Choi, A. Kargar, D. Choi, Y.J. Kim, C.H. Liu, S. Yavuz, S. Jin // *Advanced Science*. – 2015. – Vol. 2 (4). – P. 1500004. – DOI: 10.1002/advs.201500004.
11. Metal sulfides as sensing materials for chemoresistive gas sensors / A. Gaiardo, B. Fabbri, V. Guidi, P. Bellutti, A. Giberti, S. Gherardi, L. Vanzetti, C. Malagù, G. Zonta // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16 (3). – P. 296. – DOI: 10.3390/s16030296.
12. Highly sensitive MoTe<sub>2</sub> chemical sensor with fast recovery rate through gate biasing / Z. Feng, Y. Xie, J. Chen, Y. Yu, S. Zheng, R. Zhang, Q. Li, X. Chen, C. Sun, H. Zhang, W. Pang, J. Liu, D. Zhang // *2D Materials*. – 2017. – Vol. 4 (2). – P. 025018. – DOI: 10.1088/2053-1583/aa57fe.
13. Bifunctional sensing characteristics of chemical vapor deposition synthesized atomic-layered MoS<sub>2</sub> / B. Cho, A.R. Kim, Y. Park, J. Yoon, Y.-J. Lee, S. Lee, T.J. Yoo, C.G. Kang, B.H. Lee, H.C. Ko, D.-H. Kim, M.G. Hahm // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2015. – Vol. 7 (4). – P. 2952–2959. – DOI: 10.1021/am508535x.
14. Photoresponsive and gas sensing field-effect transistors based on multilayer WS<sub>2</sub> nanoflakes / N. Huo, S. Yang, Z. Wei, S.-S. Li, J.-B. Xia, J. Li // *Scientific Reports*. – 2014. – Vol. 4. – P. 5209. – DOI: 10.1038/srep05209.
15. *Late D.J., Doneux T., Bougouma M.* Single-layer MoSe<sub>2</sub> based NH<sub>3</sub> gas sensor // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 105 (23). – P. 233103. – DOI: 10.1063/1.4903358.

16. Chemical vapor sensing with monolayer MoS<sub>2</sub> / F.K. Perkins, A.L. Friedman, E. Cobas, P.M. Campbell, G.G. Jernigan, B.T. Jonker // Nano Letters. – 2013. – Vol. 13 (2). – P. 668–673. – DOI: 10.1021/nl3043079.

17. Fabrication of flexible MoS<sub>2</sub> thin-film transistor arrays for practical gas-sensing applications / Q. He, Z. Zeng, Z. Yin, H. Li, S. Wu, X. Huang, H. Zhang // Small. – 2012. – Vol. 8 (19). – P. 2994–2999. – DOI: 10.1002/smll.201201224.

18. Functionalization of transition metal dichalcogenides with metallic nanoparticles: implications for doping and gas-sensing / D. Sarkar, X. Xie, J. Kang, H. Zhang, W. Liu, J. Navarrete, M. Moskovits, K. Banerjee // Nano Letters. – 2015. – Vol. 15 (5). – P. 2852–2862. – DOI: 10.1021/nl504454u.

19. Tungsten dichalcogenides as possible gas-sensing elements / V.A. Kuznetsov, A.Y. Ledneva, S.B. Artemkina, M.N. Kozlova, G.E. Yakovleva, A.S. Berdinsky, A.I. Romanenko, V.E. Fedorov // 2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), May 22–26, 2017, Opatija, Croatia: Proceedings. – Opatija, Croatia, 2017. – P. 48–52.

**Кузнецов Виталий Анатольевич**, инженер I категории лаборатории физики низких температур Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН. Основное направление научных исследований – электронный транспорт, композиционные материалы, тензорезистивный эффект, газовые сенсоры. Имеет 25 публикаций. E-mail: vitalii.a.kuznetsov@gmail.com.

**Федоров Андрей Александрович**, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электронный транспорт, газовые сенсоры. E-mail: andrew\_fedorov\_1999@mail.ru.

**Наберухин Михаил Андреевич**, студент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – электронный транспорт, газовые сенсоры. E-mail: mihailenaberukhin@gmail.com.

**Бердинский Александр Серафимович**, кандидат технических наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – низкоразмерные системы, электронный транспорт. Имеет более 100 публикаций. E-mail: berdinsky.alexander@gmail.com.

**Полтарак Павел Андреевич**, младший научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН. Основное направление научных исследований – халькогениды металлов и халькогениды переходных металлов. Имеет 10 публикаций. E-mail: poltarak@niic.nsc.ru.



**Федоров Владимир Ефимович**, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории синтеза кластерных соединений и материалов Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН. Основное направление научных исследований – химия и физика твердого тела, соединения переходных металлов, низкоразмерные неорганические соединения. Имеет более 500 публикаций. E-mail: fed@niic.nsc.ru.

DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146

### Transition metal chalcogenides as sensitive elements for gas sensors\*

**V.A. Kuznetsov<sup>1</sup>, A.A. Fedorov<sup>2</sup>, M.A. Naberukhin<sup>3</sup>, A.S. Berdinsky<sup>4</sup>, P.A. Poltarak<sup>5</sup>, V.E. Fedorov<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, engineer of Laboratory of low temperature physics. E-mail: vitalii.a.kuznetsov@gmail.com

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the Department of Semiconductors and Microelectronics. E-mail: andrew\_fedorov\_1999@mail.ru

<sup>3</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, student of the Department of Semiconductors and Microelectronics. E-mail: mihaillenaberukhin@gmail.com

<sup>4</sup> Novosibirsk State Technical University, 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, C. Sc. (Eng.), associate professor of the Department of Semiconductors and Microelectronics. E-mail: berdinsky.alexander@gmail.com

<sup>5</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, junior researcher of Laboratory of synthesis of cluster compounds and materials. E-mail: poltarak@niic.nsc.ru

<sup>6</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation, D. Sc. (Chem.), professor, principal researcher of Laboratory of synthesis of cluster compounds and materials. E-mail: fed@niic.nsc.ru

Today, gas sensors with sensitive elements based on semiconducting metal oxides are widely used in detecting different gases in ambient. One of the main problems of their applications is the need of heating of sensitive elements up to high temperatures. Thereby many research groups are involved in the search for new sensitive materials and in modifying established ones. One of the representatives of such new materials is transition metal chalcogenides. In the present work monocrystalline transition metal di- and trichalcogenides are studied as sensing materials for volatile organic compounds. It is shown that the samples, depending on their nature, exhibit either positive or negative response at room temperature to the presence of reducing gas ethanol in ambient, that is, the electrical resistance of the samples either increases or decreases, respectively.

**Keywords:** gas sensor, transition metal chalcogenides (TMC), electron transport

---

\* Received 07 November 2018.

## REFERENCES

1. Fraden J. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. 5th ed. Cham [et al.], Springer International Publishing Switzerland, 2016.
2. Korotcenkov G. *Handbook of gas sensor materials*. Vol. 1. *Conventional approaches*. New York, Springer, 2013. 442 p.
3. Korotcenkov G. *Handbook of gas sensor materials*. Vol. 2. *New trends and technologies*. New York, Springer, 2014. 454 p.
4. Solomon S. *Sensors handbook*. 2nd ed. New York [et al.], McGraw-Hill, 2010. 1385 p.
5. Ripka P., Tipek A., ed. *Modern sensors handbook*. London, ISTE Ltd, 2007.
6. Arshak K., Moore E., Cavanagh L., Harris J., McConigly B., Cuniffe C., Lyons G., Clifford S. Determination of the electrical behaviour of surfactant treated polymer/carbon black composite gas sensors. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2005, vol. 36 (4), pp. 487–491. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.10.015.
7. Bondavalli P., Legagneux P., Pribat D. Carbon nanotubes based transistors as gas sensors: state of the art and critical review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, vol. 140 (1), pp. 304–318. DOI: 10.1016/j.snb.2009.04.025.
8. Yang W., Gan L., Li H., Zhai T. Two-dimensional layered nanomaterials for gas-sensing applications. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2016, vol. 3, pp. 433–451. DOI: 10.1039/C5QI00251F.
9. Cho S.-Y., Koh H.-J., Yoo H.-W., Kim J.-S., Jung H.-T. Tunable volatile-organic-compound sensor by using au nanoparticle incorporation on MoS<sub>2</sub>. *ACS Sensors*, 2017, vol. 2 (1), pp. 183–189. DOI: 10.1021/acssensors.6b00801.
10. Kuru C., Choi C., Kargar A., Choi D., Kim Y.J., Liu C.H., Yavuz S., Jin S. MoS<sub>2</sub> Nanosheet–Pd nanoparticle composite for highly sensitive room temperature detection of hydrogen. *Advanced Science*, 2015, vol. 2 (4), p. 1500004. DOI: 10.1002/advs.201500004.
11. Gaiardo A., Fabbri B., Guidi V., Bellutti P., Giberti A., Gherardi S., Vanzetti L., Malagù C., Zonta G. Metal sulfides as sensing materials for chemoresistive gas sensors. *Sensors*, 2016, vol. 16 (3), p. 296. DOI: 10.3390/s16030296.
12. Feng Z., Xie Y., Chen J., Yu Y., Zheng S., Zhang R., Li Q., Chen X., Sun C., Zhang H., Pang W., Liu J., Zhang D. Highly sensitive MoTe<sub>2</sub> chemical sensor with fast recovery rate through gate biasing. *2D Materials*, 2017, vol. 4 (2), p. 025018. DOI: 10.1088/2053-1583/aa57fe.
13. Cho B., Kim A.R., Park Y., Yoon J., Lee Y.-J., Lee S., Yoo T.J., Kang C.G., Lee B.H., Ko H.C., Kim D.-H., Hahn M.G. Bifunctional sensing characteristics of chemical vapor deposition synthesized atomic-layered MoS<sub>2</sub>. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7(4), pp. 2952–2959. DOI: 10.1021/am508535x.

14. Huo N., Yang S., Wei Z., Li S.-S., Xia J.-B., Li J. Photoresponsive and gas sensing field-effect transistors based on multilayer WS<sub>2</sub> nanoflakes. *Scientific Reports*, 2014, vol. 4, p. 5209. DOI: 10.1038/srep05209.
15. Late D.J., Doneux T., Bougouma M. Single-layer MoSe<sub>2</sub> based NH<sub>3</sub> gas sensor. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105 (23), p. 233103. DOI: 10.1063/1.4903358.
16. Perkins F.K., Friedman A.L., Cobas E., Campbell P.M., Jernigan G.G., Jonker B.T. Chemical vapor sensing with monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nano Letters*, 2013, vol. 13 (2), pp. 668–673. DOI: 10.1021/nl3043079.
17. He Q., Zeng Z., Yin Z., Li H., Wu S., Huang X., Zhang H. Fabrication of flexible MoS<sub>2</sub> thin-film transistor arrays for practical gas-sensing applications. *Small*, 2012, vol. 8 (19), pp. 2994–2999. DOI: 10.1002/smll.201201224.
18. Sarkar D., Xie X., Kang J., Zhang H., Liu W., Navarrete J., Moskovits M., Banerjee K. Functionalization of transition metal dichalcogenides with metallic nanoparticles: implications for doping and gas-sensing. *Nano Letters*, 2015, vol. 15 (5), pp. 2852–2862. DOI: 10.1021/nl504454u.
19. Kuznetsov V.A., Ledneva A.Y., Artemkina S.B., Kozlova M.N., Yakovleva G.E., Berdinsky A.S., Romanenko A.I., Fedorov V.E. Tungsten dichalcogenides as possible gas-sensing elements. *2017 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, May 22–26, 2017, Opatija, Croatia: proceedings, pp. 48–52.

Для цитирования:

Халькогениды переходных металлов в качестве чувствительных элементов газовых сенсоров / В.А. Кузнецов, А.А. Федоров, М.А. Наберухин, А.С. Бердинский, П.А. Полтарак, В.Е. Федоров // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 3–4 (93). – С. 136–146. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146.

For citation:

Kuznetsov V.A., Fedorov A.A., Naberukhin M.A., Berdinsky A.S., Poltarak P.A., Fedorov V.E. Khal'kogenidy perekhodnykh metallov v kachestve chuvstvitel'nykh elementov gazovykh sensorov [Transition metal chalcogenides as sensitive elements for gas sensors]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3–4 (93), pp. 136–146. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-3-4-136-146.