

УДК (54.061 + 546.05 + 546.06) : (546.774 + 546.719)

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСУЛЬФИДА РЕНИЯ(IV)

**А.М. Ионов¹, М.Р. Кобрин^{2,@}, Р.Н. Можчилъ¹, А.С. Сигов²,
Ю.В. Сыров², В.В. Фомичев²**

¹Институт физики твердого тела Российской академии наук,
Черноголовка, Московская область 142432, Россия

²Московский технологический университет, Москва 119571, Россия

@Автор для переписки, e-mail: kobrin92@ya.ru

Синтез и исследование халькогенидов переходных элементов в низких степенях окисления открывают широкие перспективы для развития фундаментальных проблем физики конденсированного состояния и создания новых функциональных материалов электронной техники. Особый интерес представляют дихалькогениды переходных металлов состава MX_2 , где M – Mo, W, Re; X – S, Se, Te, которые находят применение в устройствах оптоэлектроники, радиофотоники, в лазерной физике, технике связи и т.д. В настоящей работе выполнен анализ литературных данных по синтезу и исследованию сульфидов переходных элементов вышеуказанного состава. Предложен и реализован способ прямого высокотемпературного синтеза ReS_2 из исходных элементов. Полученное соединение идентифицировано методами рентгенофазового анализа, рентгенофотоэлектронной и ИК-спектроскопии. Показано, что оно кристаллизуется в структурном типе CdI_2 , и рений присутствует в синтезированном дисульфиде в степени окисления +4. На основании анализа ИК-спектров в длинноволновой области сделан вывод, что структура дисульфида рения характеризуется уменьшением угла при мостиковом атоме рения по сравнению с дисульфидом молибдена. Это приводит к деформации и сжатию слоев, формирующих кристаллическую структуру.

Ключевые слова: рений, молибден, дисульфиды, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, инфракрасная спектроскопия.

SYNTHESIS AND STUDY OF RHENIUM(IV) DISULPHIDE

A.M. Ionov¹, M.R. Kobrin^{2,@}, R.N. Mozhchil¹, A.S. Sigov², Yu.V. Syrov², V.V. Fomichev²

¹Institute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, Moscow region 142432, Russia

²Moscow Technological University, Moscow 119571, Russia

@Corresponding author e-mail: kobrin92@ya.ru

Synthesis and study of complex chalcogenides in the low oxidation state opens unexpected new opportunities of studying some fundamental problems of condensed matter physics. Dichalcogenides of transition metals, i.e., compounds with the general formula MX_2 , where M is molybdenum, tungsten, rhenium etc., and X is sulphur, selenium or tellurium, are especially interesting. These dichalcogenides find applications in optoelectronic devices, radiophotonics, in laser physics, communication technology, etc. This study contains a survey of literature concerning the synthesis of sulphides of transition

elements from different groups of the Periodic table in low oxidation states. A method of direct high-temperature synthesis of ReS_2 from source components has been proposed and implemented. The synthesized compound was identified by the X-ray fluorescence, method of photoelectron spectroscopy and IR absorption spectroscopy. We show that rhenium(IV) disulphide crystallizes in CdI_2 structural type. X-ray photoelectron spectroscopy shows that rhenium in the oxidation state of four is present. IR spectrum shows that rhenium(IV) disulphide structure in contrast to molybdenum(IV) disulphide is characterized by a greater deformation of the layers forming the crystal structure.

Keywords: rhenium, molybdenum, disulphides, X-ray photoelectron spectroscopy, infrared spectroscopy.

Введение

Халькогениды переходных элементов в низких степенях окисления представляют собой относительно мало исследованный класс соединений. Анализ литературы показывает, что большее внимание уделяется сульфидам [1–5]. При этом синтез и исследования выполнены, как правило, для простых соединений. Данные для двойных или более сложных халькогенидов крайне ограничены. В то же время халькогениды переходных металлов перспективны и с точки зрения развития общих кристаллохимических представлений, и в плане возможности их практического использования в качестве функциональных материалов электронной техники. В частности, известно, что они, как правило, имеют полупроводниковую природу проводимости и, наряду с этим, проявляют важные физико-химические свойства – сегнетоэлектрические, каталитические, оптические, обладают запрещенной зоной перестраиваемой ширины [5–11].

Основным методом синтеза простых халькогенидов переходных элементов в низких степенях окисления является непосредственное взаимодействие порошков металлов с элементарной серой. Таким способом получены, например, Sc_2S_3 , Sc_2Te_3 [12], Zr_2S [13], CrTe , CrSe [1] и NbS [6]. Гидротермальным методом (исходными компонентами служили $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0.005 M), $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{HCl}$ (0.01 M), $\text{Na}_2\text{S} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0.02 M), деионизированная вода и ПАВ) синтезирован WS_2 [8]. Из раствора молибдата аммония, лимонной кислоты, гидрата гидразина и тиосульфата натрия получен MoS_2 в виде тонкой пленки [7]. С помощью газотранспортной реакции выделены MnS , MnSe [14].

Как показал анализ литературы, значительное внимание уделяется дисульфидам молибдена и вольфрама в виде тонких пленок [15–19] и наночастиц [20, 21], в которых наблюдается генерация второй гармоники излучения [9, 22–24]. Однако исчерпывающего физико-химического исследования полученных фаз, как правило, не проводилось.

Ранее дисульфид рения был синтезирован с помощью газотранспортной реакции [25–28], из ReO_3

спеканием с серой в вакуумированной кварцевой трубке [29] и из $\text{Re}_2(\text{CO})_{10}$ в автоклаве [15].

Цель настоящей работы – синтез дисульфида рения контактным спеканием порошков металлического рения и элементарной серы, а также выявление особенностей строения дисульфида рения в сравнении с дисульфидом молибдена на основе анализа их рентгенофотозлектронных и колебательных ИК-спектров поглощения.

Экспериментальная часть

В работе использовали: рений металлический порошок с содержанием не менее 99.9% рения (ГОСТ 25278.16-87), серу элементарную (производитель «Компонент-реактив», ос.ч., ТУ 3-304-10), дисульфид молибдена (производство «Спец Металл Мастер», ТУ 48-19-133-90). ReO_3 получали, как описано в [30].

Для синтеза дисульфида рения 0.744 г металлического рения и 0.282 г серы элементарной помещали в кварцевую ампулу, создавали в ней вакуум (давление 10^{-5} атм), запаивали и помещали в муфельную печь. Чтобы не допустить образования сульфида рения в высокой степени окисления, серу брали в 10% недостатке по отношению к стехиометрии. Синтез проводили в следующем режиме: в течение 5 ч ампулу с реакционной смесью постепенно нагревали до температуры 1000 °C и затем 20 ч выдерживали при указанной температуре. После спекания ампулу с образцом охлаждали в печи в течение суток. По окончании синтеза из ампулы извлекали порошок серого цвета. Выход продукта по сере – практически количественный.

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на порошковом дифрактометре Shimadzu XRD-600 (CuK_α -излучение, графитовый монохроматор). Для идентификации фаз использовали картотеку ICDD – JCPDS. ИК-спектры поглощения образцов дисульфидов в виде суспензии в вазелиновом масле между пластинами полиэтилена высокой плотности записывали на Фурье-спектрометре EQUINOX 55 Bruker (Германия). Исследования электронной структуры

и состава методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) проводили на электронном спектрометре Kratos AXIS Ultra DLD (Kratos Analytical, Великобритания) с монохроматизированным рентгеновским источником Al K α ($h\nu = 1486.6$ эВ, энергетическое разрешение 0.5 эВ).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведена рентгенограмма образца сульфида рения, полученного прямым взаимодействием металлического рения и элементарной серы. Она содержит отражения, соответствующие рентгенограмме синтезированного в работе [11] путем проведения газотранспортной реакции дисульфида рения. Полученные параметры элементарной ячейки

составляют: $a = 6.345$; $b = 6.439$; $c = 12.614$ Å, что хорошо согласуется с данными из базы JCPDS под номером 89-0341 (параметры элементарной ячейки: $a = 6.352$; $b = 6.446$; $c = 12.779$ Å). Очевидно (рис. 1), что рентгенограмма содержит также отражения, отвечающие металлическому рению. По нашему мнению, примесь металлического рения в конечном продукте не окажет существенного влияния на дальнейшее физико-химическое исследование основной фазы. Опираясь на результаты известных исследований [26] и полученные нами данные, можно с полным основанием утверждать, что полученная фаза структурно близка дисульфиду молибдена, для которого параметры элементарной ячейки: $a = 5.645(4)$; $b = 12.107(11)$; $c = 11.797(10)$ Å (структурный тип CdI $_2$).

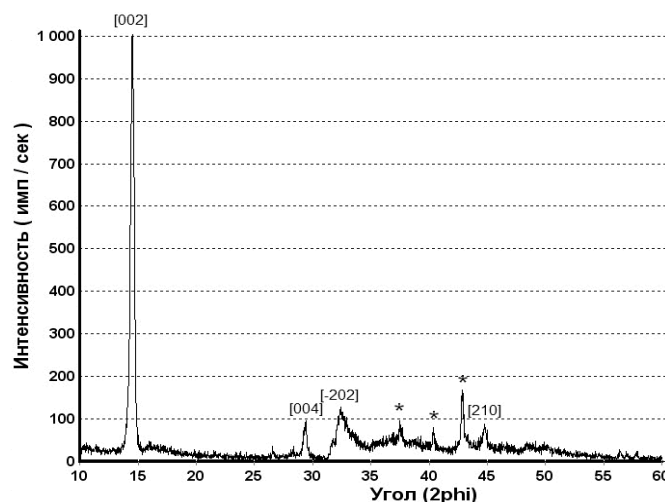


Рис. 1. Рентгенограмма сульфида рения (знаком * отмечены линии металлического рения).

Обзорный рентгенофотоэлектронный спектр синтезированного дисульфида рения и математическое разложение представлены на рис. 2 и 3. Присутствующий в РФЭС дублет Re4f с энергией связи 42.15 эВ характерен для соединений рения(IV). Следует обратить внимание на то, что в данном спектре, как и в спектрах других исследованных соединений, наблюдаются линии связей углерода и кислорода, свидетельствующие о наличии в образцах примесей этих элементов,

что является характерным признаком всех образцов *ex situ*. Заметим, что указанные примеси практически полностью удаляются при ионной бомбардировке (рис. 4, 5). Интенсивность линии, отвечающей связи Re–S в ReS $_2$, уменьшается, и после травления появляется линия Re4f $_{7/2}$ при 40.9 эВ (рис. 4). Если до травления относительная концентрация рения и серы в ReS $_2$ была близка к мольному отношению 1:2, то после травления она составила примерно 2:1.

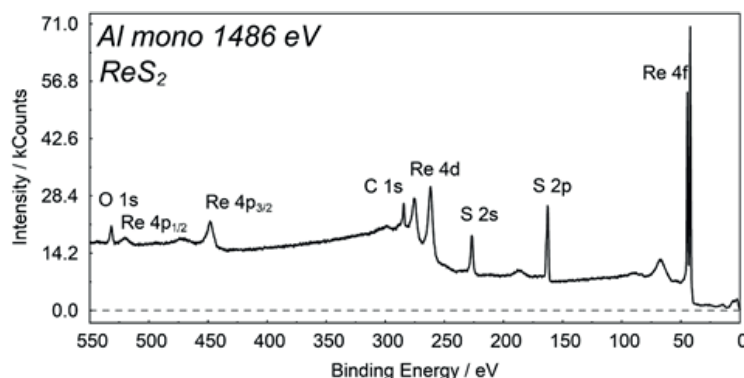


Рис. 2. Рентгенофотоэлектронный спектр дисульфида рения.

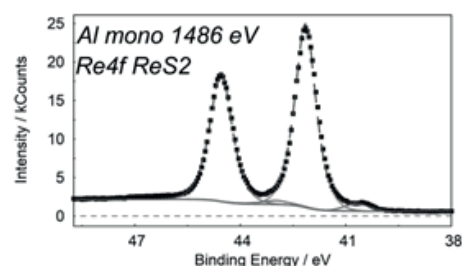


Рис. 3. Математическое разложение области Re4f спектра дисульфида рения.

Чтобы убедиться в отсутствии в полученном нами дисульфиде рения примесей оксида ReO_3 , мы специально синтезировали оксид рения(VI) и записа-

ли его рентгенофотоэлектронный спектр. Он приведен на рис. 6, а математическое разложение области $\text{Re}4f$ дано на рис. 7.

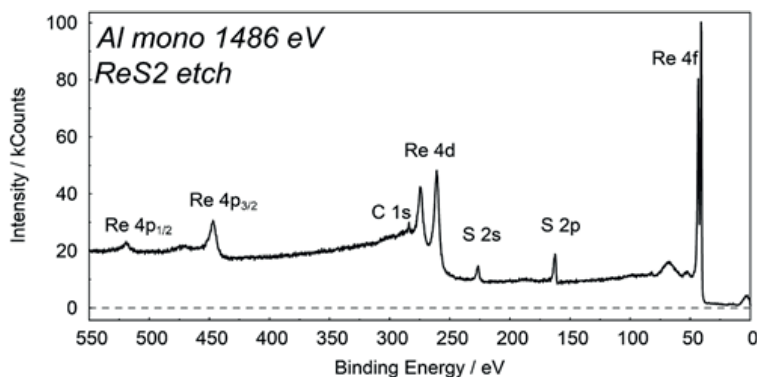


Рис. 4. Рентгенофотоэлектронный спектр дисульфида рения, полученный после ионного травления.

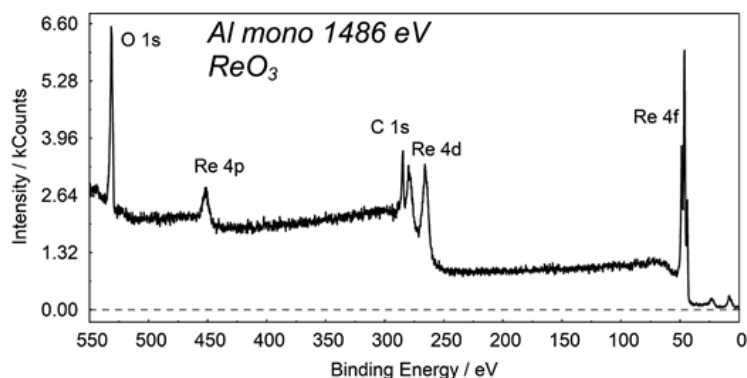


Рис. 6. Обзорный рентгенофотоэлектронный спектр оксида рения(VI).

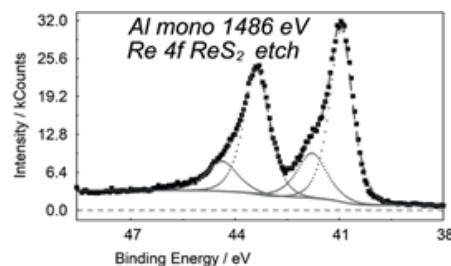


Рис. 5. Математическое разложение области $\text{Re}4f$ спектра образца дисульфида рения после ионного травления.

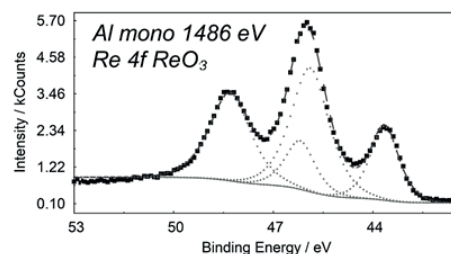


Рис. 7. Математическое разложение спектра $\text{Re}4f$ оксида рения(VI).

Эnergии связи электронов и соотношения элементов по данным рентгеновских фотоэлектронных спектров

Соединение	Элемент	Энергия связи, эВ	Соотношение элементов по данным РФЭС, %
ReO_3	Re	46.3/43.9	24 (73/27)
	O	531.5	76
ReS_2	Re	42.2	36.4
	S	162.7	63.6
ReS_2 травленный	Re	41	63.5
	S	162.3	36.5
MoS_2	Mo	229.5	33.3
	S	162.3	66.7

Математическое разложение спектра области $\text{Re}4f$ (рис. 7) для образца ReO_3 , введенного *ex situ*, продемонстрировало наличие двух дублетов, что свидетельствует о двух состояниях окисления рения (в случае единственного состояния данная линия должна быть представлена одним дублетом). Дублет с энергией связи $\text{Re}4f_{7/2}$ 46.3 эВ отвечает рению(VI), а дублет при 43.9 эВ соответствует рению с меньшей степенью окисления. Последнее, видимо, связано с поверхностными загрязнениями. Область спектра, содержащая линии кислорода, недостаточно информативна, поэтому не представляла особого интереса.

Обобщая полученные данные, можно заключить,

что полученная для дисульфида рения энергия связи $\text{Re}4f_{7/2}$, равная 42.2 эВ, выше, чем для металлического рения (40.6 эВ), и ниже, чем для ReO_3 (43.4 и 45.6 эВ). Следовательно, степень окисления рения в синтезированном дисульфиде +4.

В РФЭС дисульфида молибдена, полученном для сравнения, в области $\text{Mo}3d$, снятой с высоким разрешением, также имеет место одиночный дублет молибдена $\text{Mo}3d$, отношение молибдена к сере в образце, согласно приведенным данным, составляет 1:2 (рис. 8, 9). Важно подчеркнуть, что энергия связи $\text{S}2p$ для дисульфида рения и дисульфида молибдена имеет практически одинаковые значения.

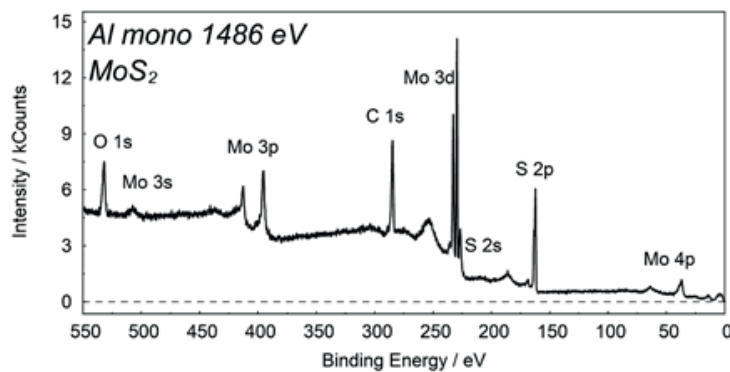


Рис. 8. Обзорный рентгенофотоэлектронный спектр дисульфида молибдена.

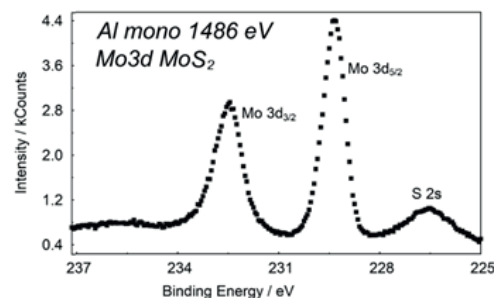


Рис. 9. Рентгенофотоэлектронный спектр области Mo3d дисульфида молибдена.

Энергии связи электронов по данным РФЭС и примерный состав соединений приведены в таблице.

Подытоживая вышесказанное, можно утверждать, что в ходе прямого высокотемпературного синтеза с использованием в качестве исходных компонентов металлического рения и элементарной серы получен сульфид рения(IV). Энергии связи S2p в дисульфидах рения и молибдена близки, а энергии связи рений–сера близки энергиям связи молибден–сера в дисульфиде молибдена. Отсюда логично сделать вывод, что изменения в колебательном спектре при переходе от дисульфида молибдена к дисульфиду рения будут определяться главным образом не динамическими факторами, а кинематическими. Последнее очевидно и в силу того, что атомная масса рения вдвое превосходит массу молибдена.

Строение дисульфида рения было предметом исследований, начиная с 1931 г. [31], причем, несмотря на несущественные расхождения в деталях, все авторы сходятся в определении слоистой структуры вещества. Известны работы, описывающие строение ReS_2 как искаженную структуру CdI_2 в рамках триклинной сингонии, пр.гр. $P\bar{1}$ ($z = 8$) [32].

Теоретико-групповой анализ колебаний кристаллов со структурой CdI_2 (фактор-группа D_{6h} про-

странственной группы кристалла, две формульные единицы в примитивной ячейке, атомы металла занимают позиции с симметрией D_{3h} , симметрия положений атомов кислорода C_{3v}) дает следующее распределение колебательных мод по неприводимым представлениям фактор-группы пространственной группы кристалла:

$$\Gamma_{\text{кол.}} = A_{1g} + 2B_{1g} + E_{1g} + 2E_{2g} + A_{2u} + B_{2u} + E_{1u} + E_{2u},$$

из которых в ИК-спектре поглощения должны быть активны 3 моды, отвечающие неприводимым представлениям типа $A_{2u} + E_{1u} + E_{2u}$.

В случае реализации структуры, описанной в [27], все атомы занимают общие положения, и распределение колебательных мод должно быть следующее:

$$\Gamma_{\text{кол.}} = 36 A_g + 33 A_u,$$

что предполагает активность в ИК-спектре тридцати трех мод.

В измеренных спектрах (рис. 10) наблюдается до тридцати полос поглощения в интервале $700\text{--}50\text{ см}^{-1}$, что вполне согласуется с последними рентгеновскими данными.

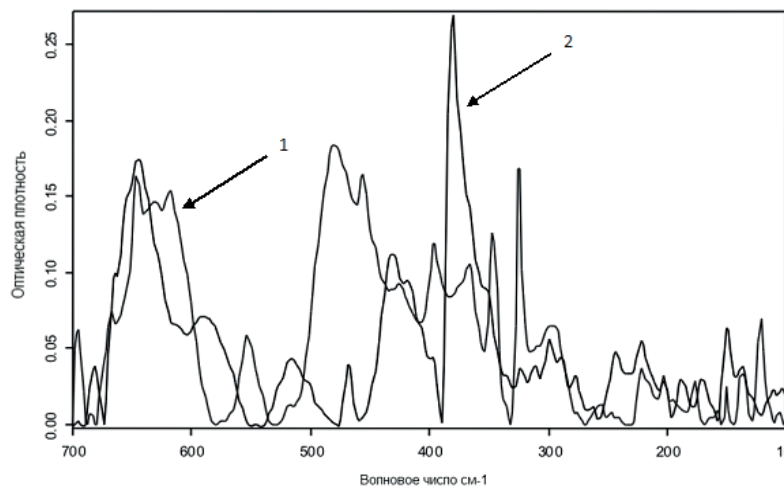


Рис. 10. ИК-спектр поглощения дисульфида рения (1) и дисульфида молибдена (2).

Ранее [33] на базе анализа колебательных спектров сложных молибдатов и вольфраматов с кристаллическими структурами, характеризующимися различной степенью и способами конденсации координационных полиэдров, была установлена следующая последовательность частот валентных колебаний молибден (вольфрам) – кислородных систем: ν асимметричных колебаний мостиковых М–О–М группировок $>$ ν колебаний концевых М–О связей $>$ ν симметричных колебаний М–О–М группировок. Увеличение межатомных расстояний М–О сопровождается понижением частот колебаний мостиковых группировок, а уменьшение валентных углов при мостиковых атомах кислорода приводит к понижению частот их асимметричных колебаний и повышению частот симметричных. Эти закономерности должны соблюдаться и в колебательных спектрах сульфидов тяжелых переходных элементов.

Анализ полученных спектров показывает, что определенные группы полос меняют свое положение при переходе от MoS_2 к ReS_2 . Так, если высокочастотные полосы поглощения сохраняют свое по-

ложение в области $700\text{--}600\text{ см}^{-1}$, то заметно растут частоты группы полос в области $575\text{--}400\text{ см}^{-1}$. В длинноволновой области (ниже 400 см^{-1}) наблюдается сдвиг ряда полос в область более низких частот. Это позволяет предположить, что при переходе от дисульфида молибдена к дисульфиду рения происходит уменьшение валентных углов при мостиковых атомах серы и сжатие, «гофрирование» слоистой структуры: симметрия позиций всех атомов понижается.

Таким образом, прямым высокотемпературным синтезом из исходных элементов получен дисульфид рения(IV), кристаллизующийся в структуре, производной от структуры CdI_2 . Из рассмотрения ИК-спектров дисульфида рения можно предположить большую, по сравнению с дисульфидом молибдена, деформацию слоев, формирующих кристаллическую структуру, и «гофрирование» слоистой структуры.

В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования Московского технологического университета.

Список литературы / References:

1. Goswami A., Nikam P.S. A study of vacuum-deposited films of CrTe and CrSe on single crystals // *Thin Solid Films*. 1972. V. 11. P. 353–364.
2. White J.G., Dismukes J.P. Rare earth sesquiselenides and sesquitellurides with the Sc_2S_3 structure // *Inorg. Chem*. 1965. V. 4. № 7. P. 970–973.
3. Franzen H.F., Smeggi J., Conard B.R. The group IV di-transition metal sulfides and selenides // *Mat. Res. Bull.* 1967. V. 2. № 12. P. 1087–1092.
4. Tsubakava I. On the magnetic properties of vanadium sulfide and selenide // *J. Phys. Soc.* 1959. V. 14. № 2. P. 196–198.
5. Szuszkiewicz W., Dynowska E., Witkowska B. Spin-wave measurements on hexagonal MnTe of NiAs-type structure by inelastic neutron scattering // *Phys. Rev. B*. 2006. V. 73. P. 1–7.
6. Narayan P.B.V., Finnore D.K. Superconductivity in the niobium and scandium monosulfide systems at pressure up to 20 kbar // *J. Less-Common Metals*. 1978. V. 61. P. 231–235.
7. Sathe D.J., Chate P.A., Sargar S.B., Kite S.V., Sande Z.D. Properties of chemically-deposited nanocrystalline MoS_2 thin films // *J. Mater. Sci: Mater. Electron*. 2015. V. 27. № 4. P. 3833–3838.
8. Cao S., Liu T., Hussain S., Zeng W., Pan F., Peng X. Synthesis and characterization of novel chrysanthemum-like tungsten disulfide (WS_2) nanostructure: Structure, growth and optical absorption property // *J. Mater. Sci: Mater. Electron*. 2015. V. 26. P. 809–814.
9. Sun J., Gu Y.-J., Lei D., Lau S.P. Mechanistic understanding of excitation correlated nonlinear optical properties in MoS nano sheets and nano dots: The role of exciton resonance // *ACS Photonics*. 2016. P. 1–34.
10. Seyler K.L., Schaibley J.R., Gong P., Rivera P. Electrical control of second-harmonic generation in a WSe monolayer transistor // *Nature Nanotechnology*. 2015. V. 73. P. 1–5.
11. Lamfers H.-J., Meetsma A., Wiegers G.A., De Boer J.L. The crystal structure of some rhenium and technetium dichalcogenides // *J. Alloys and Compounds*. 1996. V. 241. P. 34–39.
12. Dismukes J.P., Lethite G. Rare earth sesquiselenides and sesquitellurides with the Sc_2S_3 structure // *Inorg. Chem*. 1965. V. 4. № 7. P. 970–973.
13. Yao X., Franzen H.F. Structure refinement and chromium solubility for Zr_2S // *J. Less-Common Metals*. 1988. V. 142. P. 27–29.
14. Pajaczowska A. Chemical transport of MnS and MnSe using HCl as a transporting agent // *Mat. Res. Bull.* 1983. V. 18. P. 397–403.
15. Gordon R.A., Yang D., Crozier E.D., Jiang D.T., Frindt R.F. Structures of exfoliated single layers of WS_2 , MoS_2 and MoSe_2 in aqueous suspension // *Phys. Rev. B*. 2002. V. 65. P. 65–73.
16. Hu Z., Zhang S. The electronic properties tuned by the phase transition between the semiconducting and metallic phase of monolayer MoS_2/WS_2 // *Phase Transitions: A Multinatl. J.* 2015. V. 88. Iss. 7. P. 726–734.
17. Zhao X., Dai X., Xia C. Magnetic properties of two nearest Cu-doped monolayer WS_2 : A first-principles study // *Solid State Commun.* 2015. V. 217. P. 66–69.
18. Bui V.Q., Pham T.-T., Le D.A., Thi C.M., Le H. A first-principles investigation of various gas (CO , H_2O , NO , and O_2) absorptions on a WS_2 monolayer: Stability and electronic properties // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2015. V. 27. № 11. doi.org/10.1088/0953-8984/27/30/305005.

19. Siddiqui G.U., Ali J., Choi K.H., Jang Y., Lee K. Fabrication of blue luminescent MoS₂ quantum dots by wet grinding assisted eco-solvent sonication // J. Luminescence. 2016. V. 169. P. 342–347.
20. Xie H., Jiang B., He J., Xia X., Pan F. Lubrication performance of MoS₂ and SiO₂ nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts // Tribology Int. 2016. V. 93. Part A. P. 63–70.
21. Kumar K.S., Li W., Choi M., Kim S.M., Kim J. Synthesis and lithium storage properties of MoS₂ nanoparticles prepared using supercritical ethanol // Chem. Eng. J. 2016. V. 285. P. 517–527.
22. Jassim N.M., Wang K., Han X., Long H., Wang B., Lu P. Plasmon assisted enhanced second-harmonic generation in single hybrid Au/ZnS nanowires // Opt. Mater. 2016. V. 64. P. 257–261.
23. Shi S.L., Xu S.J., Xu Z.-H., Roy V.A.L., Che C.-M. Broadband second harmonic generation from ZnO nano-tetrapods // Chem. Phys. Lett. 2011. V. 506. № 4–6. P. 226–229.
24. Hu H., Wang K., Long H., Han X., Chen H., Wang B., Lu P. Concentrated second-harmonic generation from a single Al-covered ZnS nanobelt // Laser Photonics Rev. 2016. P. 3–8. DOI: 10.1002/lpor.201600263.
25. Ho C.H., Huang Y.S., Electronic structure of ReS₂ and ReSe₂ from first-principles calculations, photoelectron spectroscopy, and electrolyte electroreflectance // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. № 23. P. 766–771.
26. Marzic J.V., Kershaw R. Photoelectronic properties of ReS₂ and ReSe₂ single crystals // J. Solid State Chem. 1984. № 51. P. 170–175.
27. Huang T.-P., Lin D.-Y. Polarized thermorefectance and reflectance study of ReS₂ and ReS₂: Au single crystals // Jap. J. Appl. Phys. 2011. № 50. P. 1–6.
28. Kim Y., Kang B. Direct synthesis of large-area continuous ReS₂ films on a flexible glass at low temperature // 2D Mater. 2017. № 4. P. 1–9.
29. Aliaga J.A., Zepeda T.N. Microspherical ReS₂ as a high-performance hydrodesulfurization catalyst // Catal. Lett. 2017. V. 147. Iss. 5. P. 1243–1251.
30. Щеглов П.А., Дробот Д.В. Гетерогенные равновесия в системе рений–кислород // Журн. физ. химии. 2006. Т. 80. № 11. С. 2044–2050.
- Shcheglov P.A., Drobot D.V. Heterogeneous equilibria in the rhenium–oxygen system // Zhurnal fizicheskoi khimii (Russian Journal of Phys. Chem.). 2006. V. 80. № 11. P. 2044–2050. (in Russ.).
31. Alcock N.W., Kjekshus A. Crystal structure of ReS₂ // Acta Chem. Scand. 1965. V. 19. P. 79–94.
32. Wildervank J.C., Jellinek F. The dichalcogenides of technetium and rhenium // J. Less-Common Metals. 1970. V. 24. P. 73–81.
33. Фомичев В.В., Полозникова М.Э., Кондратов О.И. Структурные особенности, спектральные и энергетические характеристики молибдатов и вольфраматов щелочных элементов // Успехи химии. 1992. Т. 61. Вып. 9. С. 1603–1622.
- Fomichev V.V., Poloznikova M.E., Kondratov O.I. Structural features, spectral and energy characteristics of molybdates and tungstates of alkaline elements // Uspekhi Khimii (Russian Chemical Review). 1992. V. 61. Iss. 9. P. 1603–1622. (in Russ.).

Об авторах:

Ионов Андрей Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук (Россия, 142432, Московская область, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2).

Кобрин Михаил Романович, аспирант кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов имени К.А. Большакова Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (Россия, 119571, г. Москва, просп. Вернадского, д. 86).

Можиль Раис Николаевич, аспирант ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук (Россия, 142432, Московская область, Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2).

Сигов Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, президент ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, д. 78).

Сыров Юрий Вячеславович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии функциональных материалов и структур Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119435, г. Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1).

Фомичев Валерий Вячеславович, доктор химических наук, профессор кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов имени К.А. Большакова Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (Россия, 119571, Москва, просп. Вернадского, д. 86).

About authors:

Andrey M. Ionov, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Institute of Solid State Physics of RAS (2, Academica Osipyana st., Chernogolovka, Moscow region, 142432, Russia).

Mikhail R. Kobrin, Postgraduate Student, K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanoscale and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia)

Rais N. Mozhchil', Postgraduate Student, Institute of Solid State Physics of RAS (2, Academica Osipyana st., Chernogolovka, Moscow region, 142432, Russia).

Aleksandr S. Sigov, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Academician of RAS, President of Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Yuri V. Syrov, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Chair of Materials Science and Technology of Functional Materials and Structures, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (1, Malaya Pirogovskaya st., Moscow 119435, Russia).

Valery V. Fomichev, Dr.Sc. (Chemistry), Professor, K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanoscale and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).