

## Гидротермальный синтез и сенсорные свойства гидроксостанната цинка

А. И. Максимов<sup>1</sup>, С. С. Налимова<sup>1</sup>✉, Е. А. Левкевич<sup>1</sup>, З. В. Шомахов<sup>2</sup>,  
С. А. Кириллова<sup>1</sup>, В. А. Мошников<sup>1</sup>, А. В. Соломонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет  
им. Х. М. Бербекова, Нальчик, Россия

✉ [sskarpova@list.ru](mailto:sskarpova@list.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время актуальной задачей в области газовой сенсорики является улучшение характеристик (сенсорный отклик и быстродействие), а также снижение рабочих температур. Для этих целей исследуются многокомпонентные оксидные системы. Одними из наиболее перспективных материалов являются различные модификации системы Zn–Sn–O.

**Цель работы.** Разработка методик гидротермального синтеза наночастиц гидроксостанната цинка, отличающихся используемыми прекурсорами. На основе синтезированных наночастиц сформированы и протестированы активные слои газовых сенсоров.

**Материалы и методы.** Наночастицы гидроксостанната цинка получены гидротермальным синтезом в течение 6 часов при 90 °С. Были выбраны две методики с использованием различных прекурсоров. Полученные образцы проанализированы с помощью растровой электронной микроскопии, рентгеновского фазового анализа, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. По результатам спектрофотометрии определена ширина запрещенной зоны образцов. Газочувствительные свойства исследованы при различных условиях (целевой газ, температура, дополнительное воздействие УФ-излучения).

**Результаты.** Комплексное исследование синтезированных структур показало, что в зависимости от используемой методики получения характер их взаимодействия с целевыми газами является принципиально разным. Так, образцы ZnSn(OH)6\_1 проявляют отклик при комнатной температуре и обладают высоким быстродействием. Это связано с тем, что на их поверхности преобладают ионы цинка. Для образцов ZnSn(OH)6\_2, на поверхности которых преобладают ионы олова, окруженные ОН-группами, отклик при комнатной температуре возможен только с дополнительной активацией УФ-излучением. При этом время отклика и время восстановления составляют порядка сотен секунд.

**Заключение.** В статье продемонстрированы возможности использования наночастиц гидроксостанната цинка, полученных гидротермальным методом, для газовых сенсоров, работающих при комнатной температуре. При этом решающим фактором является выбор методики синтеза.

**Ключевые слова:** гидроксостаннат цинка, наночастицы, газовые сенсоры, гидротермальный синтез, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

**Для цитирования:** Гидротермальный синтез и сенсорные свойства гидроксостанната цинка / А. И. Максимов, С. С. Налимова, Е. А. Левкевич, З. В. Шомахов, С. А. Кириллова, В. А. Мошников, А. В. Соломонов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 86–98.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-86-98

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.03.2025; принята к публикации после рецензирования 19.06.2025; опубликована онлайн 29.09.2025

## Hydrothermal Synthesis and Gas Sensing Properties of Zinc Hydroxostannate

Alexander I. Maximov<sup>1</sup>, Svetlana S. Nalimova<sup>1✉</sup>,  
Ekaterina A. Levkevich<sup>1</sup>, Zamir V. Shomakhov<sup>3</sup>, Svetlana A. Kirillova<sup>1</sup>,  
Vyacheslav A. Moshnikov<sup>1</sup>, Alexander V. Solomonov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Kabardino-Balkarian State University n. a. H. M. Berbekov, Nalchik, Russia

✉ sskarpova@list.ru

### Abstract

**Introduction.** Currently in gas sensing there is an urgent need to improve performance, including sensor response and speed, as well as to reduce operating temperatures. To achieve these goals, multicomponent oxide systems are being studied. Various modifications of Zn–Sn–O system are among the most promising materials.

**Aim.** To develop techniques for the hydrothermal preparation of zinc hydroxostannate nanoparticles using different precursors. Active layers for gas sensors were created and tested using these synthesized nanoparticles.

**Materials and methods.** Zinc hydroxostannate nanoparticles were synthesized using hydrothermal methods for 6 hours at a temperature of 90 °C. Two techniques using different precursors were used to obtain the samples. The samples were then analyzed using scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and X-ray photoelectron spectroscopy. Based on the optical spectroscopy results, the band gap of zinc hydroxostannate was determined. Gas sensing properties of the nanoparticles were investigated under different conditions, including target gases, temperatures, and exposure to UV radiation.

**Results.** A comprehensive study of the synthesized structures has shown that the nature of their interaction with target gases is different depending on the synthesis technique. Specifically, ZnSn(OH)<sub>6</sub>\_1 samples demonstrate a response at room temperature and are highly rapid. This is attributed to the predominance of zinc ions on their surface. In contrast, ZnSn(OH)<sub>6</sub>\_2 samples, with a surface rich in tin ions surrounded by OH groups, require additional activation by UV radiation to achieve a response at room temperature. At the same time, the response and recovery times are in the order of hundreds of seconds.

**Conclusion.** The paper explores the potential of using zinc hydroxostannate nanoparticles created through the hydrothermal process for room temperature gas sensors. The key factor in this study is the selection of the synthesis technique.

**Keywords:** zinc hydroxostannate, nanoparticles, gas sensors, hydrothermal synthesis, X-ray photoelectron spectroscopy

**For citation:** Maximov A. I., Nalimova S. S., Levkevich E. A., Shomakhov Z. V., Kirillova S. A., Moshnikov V. A., Solomonov A. V. Hydrothermal Synthesis and Gas Sensing Properties of Zinc Hydroxostannate. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 86–98.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-86-98

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 05.03.2025; accepted 19.06.2025; published online 29.09.2025

**Введение.** В 1962 г. инженером Н. Тагучи впервые были обнаружены газочувствительные свойства оксидов металлов, что положило начало созданию масштабного производства быстро реагирующих, точных и дешевых датчиков газа [1]. С тех пор полупроводниковые газовые сенсоры получили широкое распространение по всему миру. Запросы общества с течением времени растут. Сейчас на первый план выходит безопасность используемых материалов для человека и окружающей среды, благодаря чему газовые сенсоры на основе оксидов металлов привлекают особое внимание.

Повышаются требования к безопасности и точности. Также возрастает необходимость в миниатюризации устройств и снижении их энергопотребления, в чем полупроводниковые сенсоры обладают самым большим потенциалом среди прочих детекторов газа. Все больше растет интерес к использованию датчиков газа для экспресс-диагностики различных заболеваний, из-за чего увеличивается спрос на устройства с более низким порогом чувствительности. Для удовлетворения этих потребностей продолжается совершенствование технологий, а также поиск новых более эффективных материалов

активных слоев. Ценно то, что при улучшении характеристик датчика их производство остается недорогим.

Бинарные оксидные соединения – самый распространенный материал для активного слоя полупроводникового газового датчика [2–6]. Однако на данный момент они не могут полностью удовлетворить современные запросы. В ходе поиска новых материалов возобновился интерес к тройным оксидным соединениям [7–10]. Станнат цинка (ZTO) – одно из наиболее востребованных тройных химических соединений *n*-типа электропроводности, привлекающее внимание ученых благодаря своим уникальным свойствам [11]. Он может иметь одну из двух модификаций:  $ZnSnO_3$  (станнат цинка) или  $Zn_2SnO_4$  (ортостаннат цинка) [12].

Станнат цинка также может существовать в форме кристаллогидрата  $ZnSnO_3 \cdot 3H_2O$  или  $ZnSn(OH)_6$  (рис. 1) [13, 14]. Обладая высокой электронной проводимостью и подвижностью электронов, гидроксостаннат цинка нашел широкое применение в газовых датчиках, фотоэлектрохимических ячейках, литиевых батареях [15].

Для получения станната цинка наиболее часто используют следующие методы синтеза: термическое испарение и осаждение, золь-гель-метод, гидротермальный/сольвотермальный метод, метод ионного обмена, соосаждение [16]. Многие из этих методов сложны в организации

процесса и требуют больших финансовых затрат. Благодаря простоте и эффективности получения высококристаллических структур ZTO гидротермальный/сольвотермальный метод синтеза представляет наибольший интерес [17].

Цель исследования – разработка активных слоев газовых сенсоров на основе наночастиц гидроксостанната цинка, синтезированных гидротермальным методом, а также изучение влияния рабочей температуры и дополнительного воздействия ультрафиолетового излучения на отклик полученных слоев к парам изопропилового спирта.

**Материалы и методы.** Порошки гидроксостанната цинка двух типов были получены гидротермальным методом с использованием различных прекурсоров.

В первой методике в качестве прекурсоров использовали водные растворы хлорида цинка ( $ZnCl_2$ ) (0.15 моль/л), хлорида олова (IV) ( $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ ) (0.15 моль/л), гидроксида натрия (NaOH) (1 моль/л). В водный раствор хлорида олова при постоянном перемешивании были последовательно добавлены водные растворы гидроксида натрия и хлорида цинка. Раствор был выдержан в термостате при температуре 90 °С в течение 6 часов. После синтеза порошок промывался в дистиллированной воде и высушивался при температуре 80 °С. Полученный порошок был обозначен как  $ZnSn(OH)_6_1$ .

Формирование структур гидроксостанната

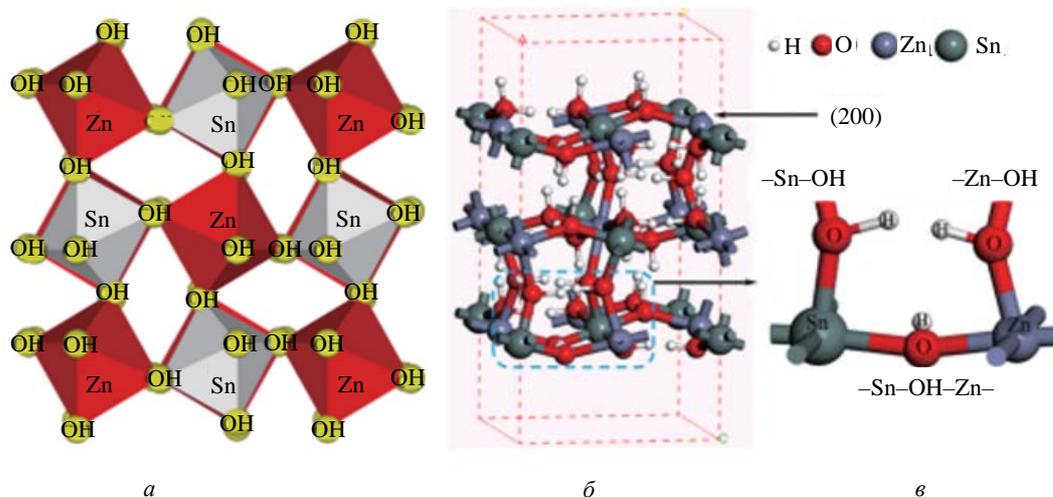


Рис. 1. Кристаллическая структура  $ZnSn(OH)_6$ : а – координационные октаэдры в структуре; б – элементарная ячейка; в – выделенный фрагмент элементарной ячейки

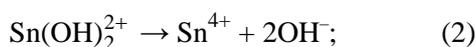
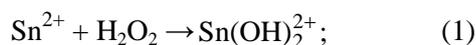
Fig. 1. Crystal structure of  $ZnSn(OH)_6$ : а – coordination octahedra in  $ZnSn(OH)_6$  structure; б – unit cell; в – selected fragment of an unit cell

цинка по данной методике схематично описывается следующим уравнением:



Во второй методике в качестве прекурсоров использовали ацетат цинка ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (0.05 моль/л), хлорид олова (II) ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (0.15 моль/л), гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ ) (0.9 моль/л), а также поливинилпирролидон (PVP) (1.2 г) и пероксид водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 30 % (5 мл). Каждый из прекурсоров был растворен в 10 мл воды, после чего все растворы были объединены в одной емкости. После перемешивания раствор был выдержан в термостате при температуре 90 °С в течение 6 часов. С помощью центрифугирования отделяли белый осадок. Далее полученный порошок промывали в дистиллированной воде и высушивали при температуре 80 °С. Полученный порошок был обозначен как  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6\_2$ .

Реакции формирования гидроксоцианата цинка и гидроксида олова можно записать в виде следующих уравнений:



Процесс (2) эндотермический и характеризуется низкой константой равновесия при комнатных температурах [18], поэтому существенное значение приобретает только при гидротермальном синтезе.

Было проведено исследование морфологии синтезированных образцов с помощью растровой электронной микроскопии. Фазовый состав образцов полученных систем контролировали методом рентгенофазового анализа ( $\text{CoK}_\alpha$ -излучение,  $\lambda = 1.78897 \text{ \AA}$ ). Диагностику химического состава поверхности методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) проводили на спектрометре K-Alpha (Thermo Scientific, США) с использованием монохроматического источника рентгеновского излучения  $\text{AlK}_\alpha$  (1486.6 эВ). Спектры поглощения коллоидных растворов частиц были получены в диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм с помощью спектрофотометра ПЭ5400 (ООО "Экросхим", Россия).

Для исследований с помощью растровой электронной микроскопии были сформированы слои на кремниевых подложках, а для исследования газочувствительных свойств – на керамических подложках с электродами. Слои наносились методом центрифугирования из растворов, полученных при диспергировании порошков ( $\text{ZnSn}(\text{OH})_6\_1$ ,  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6\_2$ ) в дистиллированной воде.

Газочувствительные свойства полученных материалов исследовались при помощи специального стенда. Измерительная ячейка состоит из алюминиевого герметичного корпуса, нагревательной пластины, светодиода, прижимных контактов, а также терморезистора, позволяющего контролировать температуру нагрева. Максимальная для поддержания температура нагревательной пластины – 300 °С. Ультрафиолетовый ( $\lambda_{\text{max}} = 365 \text{ нм}$ ) светодиод способствует сенсбилизации металлооксидных слоев за счет генерации носителей заряда. Тестовая газовая смесь подавалась через трубку непосредственно к образцу. В качестве тестовой газовой смеси были использованы пары барботируемой жидкости (ацетон, изопропиловый спирт, вода) и осушенного воздуха. Концентрация паров поддерживалась равной 1000 ppm. Ток через прижимные контакты измерялся с помощью пикоамперметра Keithley 6485. Управление параметрами измерения, а также считывание и запись данных осуществлялись через персональный компьютер в среде LabVIEW. Концентрация газовой смеси варьировалась при помощи ротаметров, один из которых контролировал скорость потока воздуха (PMS-A-0.035 ГУЗ (ООО "Прибор-М", Россия)), а другой – скорость потока смеси воздуха и паров исследуемой жидкости (VA-1043 (DWYER, США)).

Итоговая концентрация молекул газа в выходной смеси определяется формулой

$$C = \frac{p_{\text{gas}} F_{\text{gas}}}{p_{\text{atm}} (F_{\text{gas}} + F_{\text{air}})},$$

где  $p_{\text{gas}}$ ,  $F_{\text{gas}}$  – давление насыщенных паров барботируемой жидкости, скорость потока воздуха через барботер;  $p_{\text{atm}} = 760 \text{ мм рт. ст.}$  –

атмосферное давление;  $F_{\text{air}}$  – скорость потока воздуха-разбавителя.

Давление насыщенных паров рассчитывается из уравнения Антуана:

$$p_{\text{gas}} = 10^{\frac{A - B}{C + T}},$$

где  $A, B, C$  – табличные параметры аппроксимации [19];  $T$  – температура раствора, К.

Чувствительность [%] определяется по следующей формуле:

$$S = \frac{R_{\text{air}} - R_{\text{gas}}}{R_{\text{air}}} 100,$$

где  $R_{\text{air}}$  – сопротивление в атмосфере воздуха;  $R_{\text{gas}}$  – сопротивление в присутствии газ-реагента.

**Результаты.** На рис. 2 представлены типичные результаты растровой электронной микроскопии для порошков  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ , полученных гидротермальным методом. Частицы имеют форму кубов, а их размеры составляют от 30 до 250 нм.

Результаты рентгеновского фазового анализа представлены на рис. 3. Согласно литературным данным, фазовый состав всех исследуемых структур соответствует кристаллогидрату станната цинка [20], структура которого приведена на рис. 1. На представленных дифрактограммах видно, что полученные двумя приведенными методами материалы обладают высокой кристаллическостью, при этом других кристаллических фаз в них не наблюдается. Следует отметить, что методика формирования порошка  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6\_1$  приводит к меньшим размерам кристаллов в порошках, что подтвер-

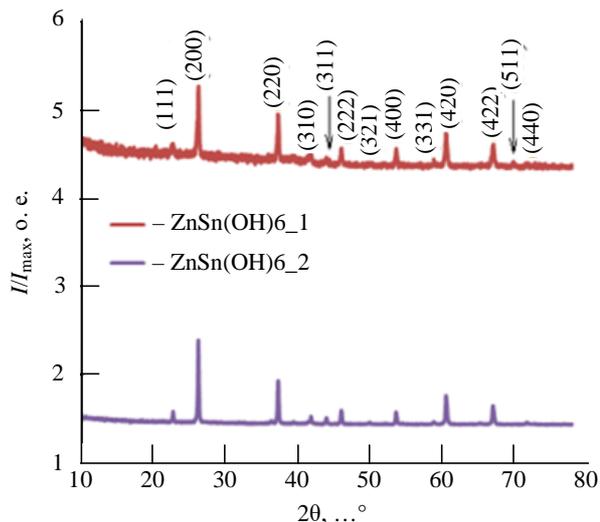
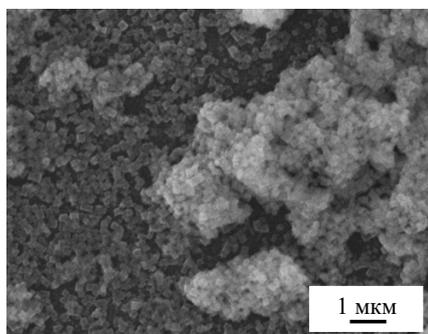


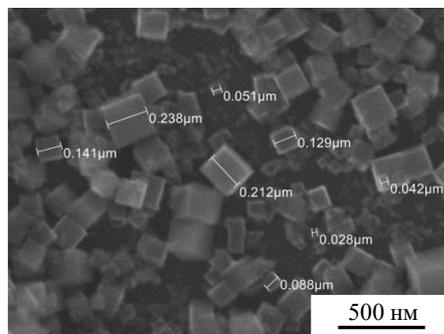
Рис. 3. Дифрактограммы порошков гидроксостанната цинка  
 Fig. 3. X-ray diffraction patterns of zinc hydroxostannate powders

ждается меньшей интенсивностью рентгеновских рефлексов в этом материале.

Состав и химическое состояние поверхности синтезированных образцов гидроксостанната цинка были проанализированы методом РФЭС. Рис. 4 показывает, что на поверхности образцов двух типов присутствует цинк, олово, кислород и углерод. Наличие углерода связано с адсорбцией  $\text{CO}_2$  из окружающей атмосферы. Пики олова  $\text{Sn}3d$  наблюдаются при энергиях связи 486.8 и 495.1 эВ (рис. 5, а) и соответствуют состоянию  $\text{Sn}^{4+}$  [21]. Близкие энергии связи имеют оже-пики  $\text{ZnLMM}$  (475.2 и 498.3 эВ), поэтому они также присутствуют на рис. 5, а. На спектре уровня  $\text{Zn}2p$  образца  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6\_1$  наблюдаются максимумы с энергиями связи 1044.3 эВ ( $\text{Zn}2p_{3/2}$ ) и 1021.3 эВ ( $\text{Zn}2p_{5/2}$ ). Соответствующие пики для образца  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6\_2$  сдвинуты на 0.1 эВ ( $\text{Zn}2p_{5/2}$ ) и 0.2 эВ ( $\text{Zn}2p_{3/2}$ ) в сторону больших энергий свя-



а



б

Рис. 2. Растровая электронная микроскопия порошков  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ : а – увеличение в 5000 раз; б – увеличение в 25 000 раз  
 Fig. 2. Scanning electron microscopy of  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$  powders: а – 5000x magnification; б – 25 000x magnification

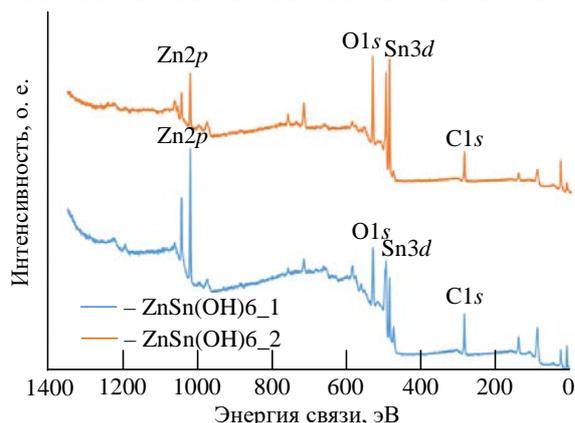


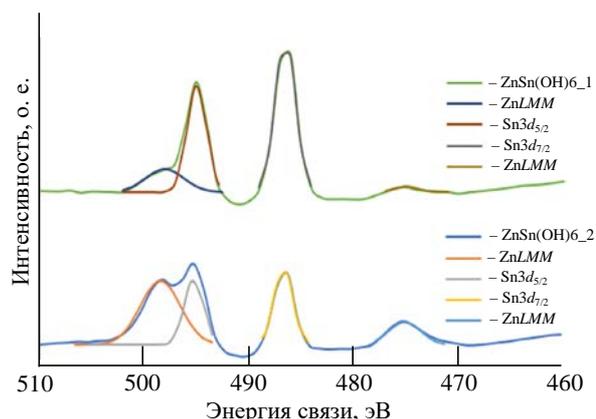
Рис. 4. Фотоэлектронные спектры порошков гидрокостанната цинка

Fig. 4. X-ray photoelectron spectra of zinc hydroxostannate powders

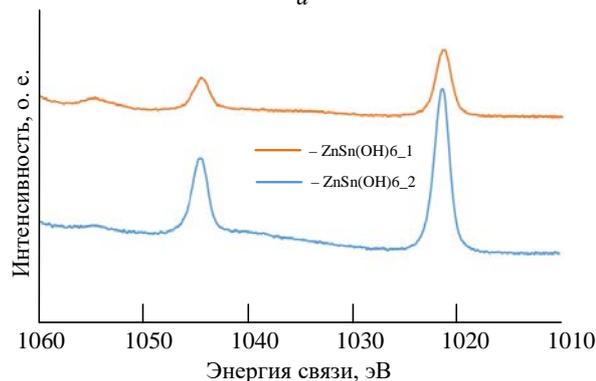
зи относительно  $\text{ZnSn(OH)}_6\_1$  (рис. 5, б). На поверхности  $\text{ZnSn(OH)}_6\_1$  можно обнаружить кислород, принадлежащий ОН-группам или кислородным вакансиям с энергией связи 531.4 эВ ( $O_{\text{vac}}$  на рис. 5, в), а также незначительную долю  $O^{2-}$ , образующего связи кристаллической решетки, с энергией связи 530.4 эВ ( $O_{\text{lat}}$  на рис. 5, в) [22]. В спектре уровня  $O1s$  образца  $\text{ZnSn(OH)}_6\_2$  наблюдается один пик с энергией связи 531.1 эВ, соответствующий кислороду поверхностных гидроксильных групп или кислородных вакансий ( $O_{\text{vac}}$  на рис. 5, в).

Анализ рентгеновских фотоэлектронных спектров (рис. 4 и 5) позволяет говорить о том, что формируемые по представленным разным технологиям материалы имеют существенно различные поверхностные свойства:

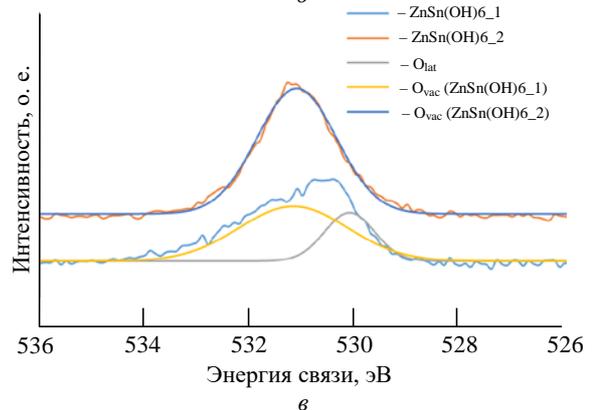
- 1) поверхностная концентрация атомов цинка существенно выше в образце  $\text{ZnSn(OH)}_6\_1$ ;
- 2) при этом в образце  $\text{ZnSn(OH)}_6\_2$  поверхность кристаллитов обогащена оловом (рис. 5, а);
- 3) олово имеет два пика (рис. 5, а) и находится в стандартном состоянии  $\text{Sn}^{4+}$ , при этом ионы олова окружены октаэдром из ОН-групп;
- 4) пики уровня  $\text{Zn}2p$  соответствуют состоянию  $\text{Zn}^{2+}$ , при этом наблюдается сдвиг максимумов в сторону больших энергий связи для образца  $\text{ZnSn(OH)}_6\_2$  по сравнению с  $\text{ZnSn(OH)}_6\_1$ ;
- 5) рис. 5, в подтверждает выводы о том, что олово появляется на поверхности вместе с октаэдрическим окружением из ОН-групп;



а



б



в

Рис. 5. Спектры основных уровней порошков гидрокостанната цинка: а –  $\text{Sn}3d$ ; б –  $\text{Zn}2p$ ; в –  $\text{O}1s$

Fig. 5. Spectra of core levels of zinc hydroxostannate powders: а –  $\text{Sn}3d$ ; б –  $\text{Zn}2p$ ; в –  $\text{O}1s$

б) в отличие от этого ионы цинка, присутствующие на поверхности, октаэдрическое окружение из ОН-групп не сохраняют, часть ОН-групп октаэдра взаимодействуют между собой вблизи поверхности и образуют связь через кислородный мостик  $\text{Zn-O-Zn}$ , при этом кислород "становится" решеточным (рис. 5, в).

Сравнение рентгеновских фотоэлектронных спектров (рис. 4) позволяет сделать предположение, объясняющее полученные результаты, что наличие стадии окислительно-восста-

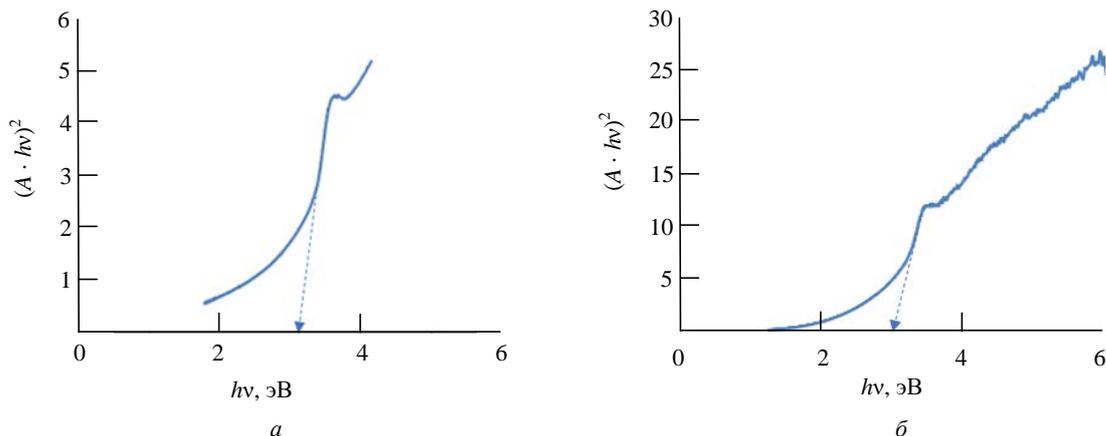


Рис. 6. Оптический спектр в координатах Тауца: а – ZnSn(OH)6\_1; б – ZnSn(OH)6\_2

Fig. 6. Tauc plots: а – ZnSn(OH)6\_1; б – ZnSn(OH)6\_2

новительной реакции (1) между хлоридом олова и перекисью водорода изменяет механизм роста кристаллов гидроксоантата цинка, так как концентрация ионов  $\text{Sn}^{4+}$  значительно ниже необходимой для стехиометрического соотношения ионов олова и цинка в растворе. Это приводит к замедлению роста кристаллитов и уменьшению количества дефектов в растущих кристаллах, а на поздних стадиях роста – к обогащению поверхности оловом.

С помощью оптической спектроскопии были изучены свойства коллоидных растворов материалов, полученных с использованием разных технологических методик. Были построены спектры оптической плотности для материалов, полученных по первой и второй методикам, и рассчитана ширина запрещенной зоны [23, 24]: для ZnSn(OH)6\_1  $E_g = 3.1$  эВ, для ZnSn(OH)6\_2  $E_g = 2.93$  эВ. На рис. 6 представлены спектры поглощения в координатах Тауца для материалов гидроксоантата цинка, где  $A$  – оптическая плотность;  $h\nu$  – энергия фотона.

Различия в количественных характеристиках спектров связаны с особенностями технологий, которые позволяют получать только небольшие объемы материалов. Кроме того, небольшую погрешность в получаемые результаты вносят процессы осаждения частиц при измерении спектров, поэтому можно считать, что спектры характеризуют наиболее мелкие фракции порошков.

На рис. 7 представлены типичные отклики ZnSn(OH)6\_1 к различным газам. На всех рисунках время подачи газа отмечено знаком  $\leftrightarrow$ .

Данные образцы не подвергались отжигу и представляют собой высококристаллические структуры гидроксоантата цинка. Исследо-

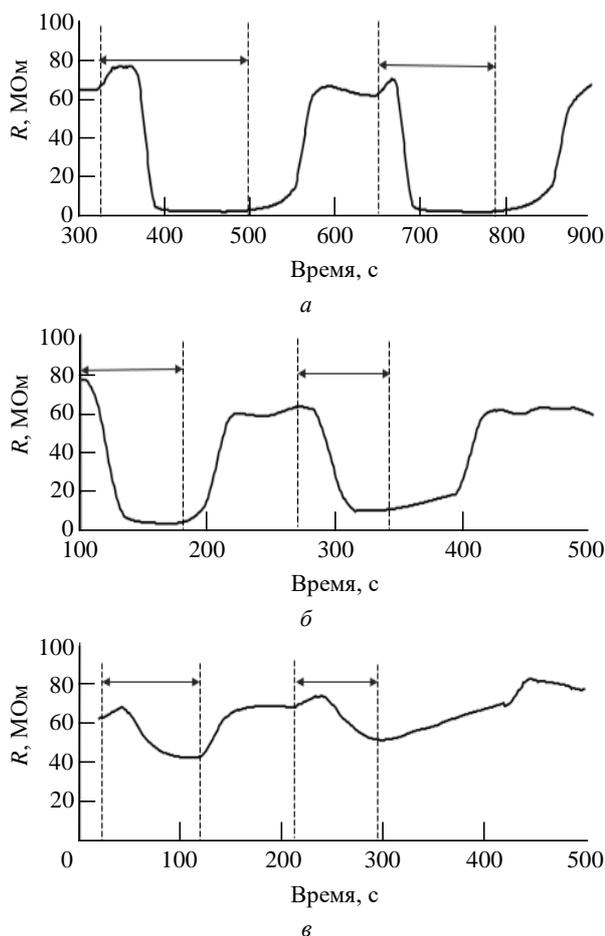
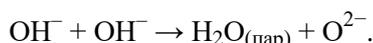


Рис. 7. Отклик ZnSn(OH)6\_1 на различные газы при комнатной температуре: а – пары изопропанола; б – пары ацетона; в – пары воды

Fig. 7. Response of ZnSn(OH)6\_1 to various gases at room temperature: а – isopropanol vapor; б – acetone vapor; в – water vapor

вание проводилось при комнатной температуре для смеси паров изопропанола, ацетона и воды с воздухом. Сопротивление при адсорбции молекул воды изменяется в 1.5 раза, при адсорбции молекул ацетона – в 8 раз, а при адсорбции изопропанола – приблизительно в 10 раз. Десорбция молекул газа с поверхности происходит за десятки секунд, что является хорошим показателем для сенсорных структур. Отклик к различным газам имеет разный характер, что дает возможность детектирования исследуемых газов одновременно. Большим преимуществом является быстрое восстановление газочувствительных систем, полученных в работе, вследствие быстрой десорбции молекул газа с поверхности образцов.

Для дальнейшего изучения были проведены эксперименты чувствительности к газам при высоких температурах (250 °С). Отклик структуры на пары изопропилового спирта представлен на рис. 8. Нагрев до температур порядка 250...300 °С приводит к потере приповерхностных ОН-групп кристалла, которые переходят в газовую фазу в виде паров воды:



В процессе измерений химическая реакция между восстанавливающими газами, содержащими углерод и водород, адсорбированными на поверхности, проходит с образованием воды, которая временно существует на поверхности в местах, которые были заняты ОН-группами. Высокое время восстановления таких слоев авторы связывают с замедленной десорбцией воды при таких повышенных по сравнению с комнатными температурах, так как адсорбированные на поверхности молекулы воды при температурах 25 °С практически отсутствуют в связи с тем, что

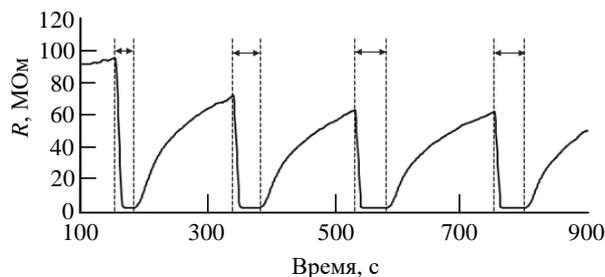


Рис. 8. Отклик  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6_1$  при температуре 250 °С на пары изопропанола

Fig. 8. Response of  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6_1$  at 250 °C to isopropanol vapors

эти центры заняты решеточными ОН-группами гидроксостанната цинка.

Газочувствительность  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6_2$  была исследована к парам  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$  (рис. 9). Измерения проводились при комнатной температуре под воздействием УФ-излучения (рис. 9, а). Концентрация газа – 1500 ppm. Чувствительность структуры составила 34 %. Ультрафиолетовое излучение в данном случае являлось дополнительным активатором реакции молекул газа с сенсорным слоем.

Также было проведено исследование чувствительности к парам  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$  при температуре измерения 300 °С (рис. 9, б). В результате адсорбции молекул сопротивление изменялось в 13 раз, чувствительность составляла 92 %.

Можно заметить, что сопротивление слоев станната цинка, полученного по различным методикам, при адсорбции молекул газа ведет себя немного по-разному.

Исследование газочувствительных свойств структур показало следующие результаты. Гидроксостаннат цинка, полученный гидротермальным методом с использованием в качестве прекурсоров хлорида цинка и хлорида олова (IV),

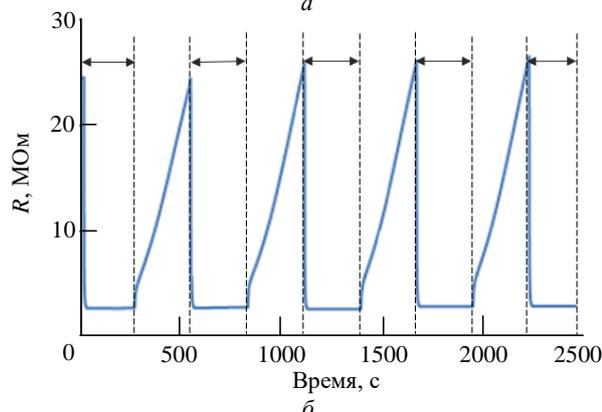
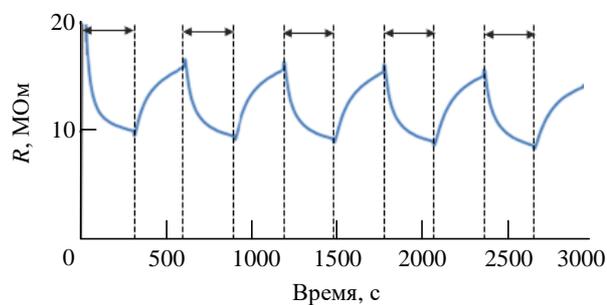


Рис. 9. Отклик  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6_2$  на пары  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ : а – при воздействии УФ-излучения; б – при нагреве до 300 °С

Fig. 9. Response of  $\text{ZnSn}(\text{OH})_6_2$  to  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$  vapors: а – when exposed to UV radiation; б – when heated to 300 °C

обладает чувствительностью к парам ацетона, изопропанола и воды при комнатной температуре. Адсорбция и десорбция молекул газа при этом происходит за десятки секунд.

Газочувствительные слои на основе гидроксостанната цинка, полученного с использованием в качестве прекурсоров ацетата цинка и хлорида олова (II), также способны детектировать газ при комнатной температуре, но нуждаются в дополнительной сенсбилизации УФ-излучением. Сенсорные слои, изготовленные по данной технологии, демонстрируют хорошую воспроизводимость с каждым циклом.

Результаты исследования газочувствительных свойств гидроксостанната цинка коррелируют с данными о химическом составе их поверхности, полученными с помощью РФЭС. При преобладании на поверхности цинка, характерного для образцов ZnSn(OH)<sub>6</sub>\_1, наблюдается высокое содержание центров адсорбции детектируемых газов (ионов Zn<sup>2+</sup>). Эти ионы, находящиеся вблизи поверхности, не удерживают вблизи себя октет OH-групп. В то же время ионы олова Sn<sup>4+</sup> за счет большего заряда могут удерживать OH-группы.

Из представленных на рис. 8 результатов видно, что нагрев не приводит к изменению со-

противления образцов ZnSn(OH)<sub>6</sub>\_1. Это может быть связано с одновременным протеканием двух конкурирующих процессов: удалением OH-групп и адсорбцией на освободившихся центрах кислорода в виде O<sup>2-</sup>. Сопротивление образцов ZnSn(OH)<sub>6</sub>\_2, в свою очередь, уменьшается при нагреве, как показано на рис. 9, а, б.

Несмотря на то что чувствительность при повышенных температурах имеет достаточно высокие значения, время отклика сенсорных слоев заметно возрастает. Кроме того, вероятно структурная эволюция образцов в процессе эксплуатации, поэтому данные эксперименты показывают необходимость использования газочувствительных свойств гидроксостанната цинка в условиях комнатной температуры (до 50 °С).

**Заключение.** В статье показаны возможности создания активных слоев газовых сенсоров, работающих при комнатной температуре, на основе наночастиц гидроксостанната цинка. Продемонстрировано, что в зависимости от условий гидротермального синтеза изменяется химический состав поверхности, при этом могут преобладать ионы цинка либо ионы олова, окруженные гидроксильными группами. Как следствие, газочувствительные свойства синтезированных образцов также отличаются.

#### Авторский вклад

**Максимов Александр Иванович** – постановка задачи; анализ экспериментальных результатов.

**Налимова Светлана Сергеевна** – анализ экспериментальных результатов.

**Левкевич Екатерина Алексеевна** – синтез образцов; измерение сенсорных свойств; анализ экспериментальных результатов.

**Шомахов Замир Валериевич** – исследование образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.

**Кириллова Светлана Анатольевна** – исследование образцов методом рентгеновской дифракции.

**Мошников Вячеслав Алексеевич** – постановка задачи; анализ экспериментальных результатов.

**Соломонов Александр Васильевич** – постановка задачи; анализ экспериментальных результатов.

#### Author's contribution

**Alexander I. Maximov**, problem statement; analysis of experimental results.

**Svetlana S. Nalimova**, analysis of experimental results.

**Ekaterina A. Levkevich**, synthesis of samples; study of sensor properties; analysis of experimental results.

**Zamir V. Shomakhov**, study of samples by X-ray photoelectron spectroscopy.

**Svetlana A. Kirillova**, study of samples by X-ray diffraction.

**Vyacheslav A. Moshnikov**, problem statement; analysis of experimental results.

**Alexander V. Solomonov**, problem statement; analysis of experimental results.

#### Список литературы

1. Gas sensors and factors influencing sensing mechanism with a special focus on MOS sensors / D. Y. Nadargi, A. Umar, J. D. Nadargi, S. A. Lokare, S. Akbar,

I. S. Mulla, S. S. Suryavanshi, N. L. Bhandari, M. G. Chaskar // J. of Materials Science. 2023. Vol. 58, № 2. P. 559–582. doi: 10.1007/s10853-022-08072-0

2. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors / C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang, R. Gao // *Sensors*. 2010. Vol. 10, № 3. P. 2088–2106. doi: 10.3390/s100302088
3. Dey A. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review // *Materials Science and Engineering: B*. 2018. Vol. 229. P. 206–217. doi: 10.1016/j.mseb.2017.12.036
4. Das S., Jayaraman V. SnO<sub>2</sub>: A comprehensive review on structures and gas sensors // *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 66. P. 112–255. doi: 10.1016/j.pmatsci.2014.06.003
5. Zhu L., Zeng W. Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017. Vol. 267. P. 242–261. doi: 10.1016/j.sna.2017.10.021
6. Архитектоника покрытий из наностержней оксида цинка для адсорбционных газовых сенсоров / А. А. Рябко, С. С. Налимова, Н. В. Пермьяков, А. А. Бобков, А. И. Максимов, В. М. Кондратьев, К. П. Котляр, М. К. Овезов, А. С. Комолов, Э. Ф. Лазнева, В. А. Мошников, А. Н. Алешин // *Журн. техн. физики*. 2023. Т. 93, № 10. С. 1494–1502. doi: 10.61011/JTF.2023.10.56288.148-23
7. Газовые сенсоры на основе наноструктур двойных и тройных оксидных систем / С. С. Налимова, В. А. Мошников, З. В. Шомахов, В. М. Кондратьев // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2024. Т. 27, № 2. С. 105–118. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-105-118
8. Улучшение сенсорных характеристик бинарных и тройных оксидных наносистем / З. В. Шомахов, С. С. Налимова, А. А. Рыбина, С. С. Бузовкин, З. Х. Калажоков, В. А. Мошников // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2023. № 15. С. 879–887. doi: 10.26456/pcascnn/2023.15.879
9. Nalimova S., Shomakhov Z. V., Moshnikov V. A. Binary and Ternary Oxide Nanostructured Multisystems for Gas Sensors // *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 48, iss. 1. Art. № 47. doi: 10.3390/CSAC2023-14880
10. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации / А. А. Рябко, А. А. Бобков, С. С. Налимова, А. И. Максимов, В. С. Левицкий, В. А. Мошников, Е. И. Теруков // *Журн. техн. физики*. 2022. Т. 92, № 5. С. 758–764. doi: 10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21
11. Современное состояние исследований в области синтеза и применения станната цинка / С. С. Налимова, А. И. Максимов, Л. Б. Матюшкин, В. А. Мошников // *Физика и химия стекла*. 2019. Т. 45, № 4. С. 311–325. doi: 10.1134/S0132665119040097
12. Continuously improved gas-sensing performance of Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> porous octahedrons by structure evolution and further ZnSnO<sub>3</sub> nanosheets decoration / Z. Li, Y. Xiong, D. Bi, Q. Liu, C. Yang, J. Zhang // *J. of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 901. Art. № 163744. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.163744
13. Application of ZnSn(OH)<sub>6</sub>-based nanomaterials in environmental photocatalysis / B. Chen, P. Ouyang, Y. Li, Y. Duan, F. Dong // *Chemical Industry and Engineering Progress*. 2023. Vol. 42, iss. 2. P. 756–764. doi: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0646
14. Enhanced photocatalytic activity of cubic ZnSn(OH)<sub>6</sub> by in-situ partial phase transformation via rapid thermal annealing / J. S. Kim, N. Kumar, U. Jung, J. Park, Mu. Naushad // *Chemosphere*. 2023. Vol. 331. Art. № 138780. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138780
15. Paul S., Barman S., Datta A. Zn-based oxide perovskite nanocomposites for energy and sensing applications // *J. of Materials Science*. 2024. Vol. 59. P. 17968–17990. doi: 10.1007/s10853-024-09765-4
16. Comprehensive review of micro/nanostructured ZnSnO<sub>3</sub>: characteristics, synthesis, and diverse applications / M. Rahman, M. S. Bashar, Md. L. Rahman, F. I. Chowdhury // *RSC Advances*. 2023. Vol. 13. P. 30798–30837. doi: 10.1039/d3ra05481k
17. Sun S., Liang S. Morphological zinc stannate: synthesis, fundamental properties and applications // *J. of Materials Chemistry A*. 2017. Vol. 5, iss. 39. P. 20534–20560. doi: 10.1039/C7TA06221D
18. Рид Р. Г., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982. 592 с.
19. Спиваковский В. Б. Аналитическая химия олова. М.: Наука, 1975. 252 с.
20. Hydroxide ZnSn(OH)<sub>6</sub>: a promising new photocatalyst for benzene degradation / X. Fu, X. Wang, Z. Ding, D. Y. C. Leung, Z. Zhang, J. Long, W. Zhang, Z. Li, X. Fu // *Appl. Catalysis B: Environmental*. 2009. Vol. 91, № 1. P. 67–72. doi: 10.1016/j.apcatb.2009.05.007
21. Effects of pH value and hydrothermal treatment on the microstructure and natural-sunlight photocatalytic performance of ZnSn(OH)<sub>6</sub> photocatalyst / S. Dong, L. Xia, F. Zhang, F. Li, Y. Wang, L. Cui, J. Feng, J. Sun // *J. of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 810. Art. № 151955. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.151955
22. Structural inheritance and change from ZnSn(OH)<sub>6</sub> to ZnSnO<sub>3</sub> compounds used for ethanol sensors: Effects of oxygen vacancies, temperature and UV on gas-sensing properties / X. Wang, X. Zhu, T. Tao, B. Leng, W. Xu, L. Mao // *J. of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 829. Art. № 154445. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154445
23. ZnSn(OH)<sub>6</sub> Photocatalyst for Methylene Blue Degradation: Electrolyte-Dependent Morphology and Performance / Z. Ren, D. Zhou, L. Zhang, M. Yu, Z. Wang, Y. Fan, D. Zhang, Q. Zhang, J. Xie // *ChemistrySelect*. 2018. Vol. 3, iss. 39. P. 10849–10856. doi: 10.1002/slct.201802195
24. Revealing DeNO<sub>x</sub> and DeVOC Reactions via the Study of the Surface and Bandstructure of ZnSn(OH)<sub>6</sub> Photocatalysts / M.-T. Pham, H.-H. Tran, T.-M. T. Nguyen, D.-P. Bui, Y. Huang, J. Cao, S.-J. You, P. V. Viet, V. H. Nam, Y.-F. Wang // *Acta Materialia*. 2021. Vol. 215, № 4. Art. № 117068. doi: 10.1016/j.actamat.2021.117068

### Информация об авторах

**Максимов Александр Иванович** – кандидат физико-математических наук (2005), доцент (2008), доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – наноматериалы; оксиды металлов; фотокатализ; фотовольтаика; газовая сенсорика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aimaximov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3065-3961>

**Налимова Светлана Сергеевна** – кандидат физико-математических наук (2013), доцент (2024), доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – наноматериалы; газовые сенсоры; оксиды металлов; дихальогениды переходных металлов; ван-дер-ваальсовы гетероструктуры; гидротермальный синтез; золь-гель-технология; солнечные элементы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: sskarpova@list.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3065-3961>

**Левкевич Екатерина Алексеевна** – магистр по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2020, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), инженер кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – наноматериалы; оксиды металлов; фотокатализ; газовая сенсорика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: levek26@gmail.com

**Шомахов Замир Валериевич** – кандидат физико-математических наук (2012), доцент (2022), директор Института электроники, робототехники и искусственного интеллекта Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова. Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия; наноструктуры; солнечные элементы; полупроводниковые соединения; перовскиты; дефекты; физико-химический анализ.

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

E-mail: shozamir@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5738-2626>

**Кириллова Светлана Анатольевна** – магистр по направлению "Химическая технология и биотехнология" (Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), 2004), старший преподаватель кафедры физической химии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – физико-химический анализ (термический анализ, дифракция рентгеновских лучей); химическая термодинамика (экспериментальное исследование и моделирование фазовых равновесий).

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: refractory-sveta@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-7912-6033>

**Мошников Вячеслав Алексеевич** – доктор физико-математических наук (1997), профессор (1999), профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – коллоидные квантовые точки; золь-гель-технология; иерархические пористые материалы; биосенсоры; солнечные элементы; фотокатализаторы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

**Соломонов Александр Васильевич** – доктор физико-математических наук (2000), профессор (2002), профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 140 научных работ. Сфера научных интересов – микроэлектроника и оптика полупроводников; нанoeлектроника; квантово-размерные гетероструктуры.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия  
E-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-6721-4159>

## References

1. Nadargi D. Y., Umar A., Nadargi J. D., Lokare S. A., Akbar S., Mulla I. S., Suryavanshi S. S., Bhandari N. L., Chaskar M. G. Gas Sensors and Factors Influencing Sensing Mechanism with a Special Focus on MOS Sensors. *J. of Materials Science*. 2023, vol. 58, no. 2, pp. 559–582. doi: 10.1007/s10853-022-08072-0
2. Wang C., Yin L., Zhang L., Xiang D., Gao R. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*. 2010, vol. 10, no. 3, pp. 2088–2106. doi: 10.3390/s100302088
3. Dey A. Semiconductor Metal Oxide Gas Sensors: A Review. *Materials Science and Engineering: B*. 2018, vol. 229, pp. 206–217. doi: 10.1016/j.mseb.2017.12.036
4. Das S., Jayaraman V. SnO<sub>2</sub>: A Comprehensive Review on Structures and Gas Sensors. *Progress in Materials Science*. 2014, vol. 66, pp. 112–255. doi: 10.1016/j.pmatsci.2014.06.003
5. Zhu L., Zeng W. Room-Temperature Gas Sensing of ZnO-Based Gas Sensor: A Review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017, vol. 267, pp. 242–261. doi: 10.1016/j.sna.2017.10.021
6. Ryabko A. A., Nalimova S. S., Permyakov N. V., Bobkov A. A., Maksimov A. I., Kondratev V. M., Koltlyar K. P., Ovezov M. K., Komolov A. S., Lazneva E. F., Moshnikov V. A., Aleshin A. N. Architectonics of Zinc Oxide Nanorod Coatings for Adsorption Gas Sensors. *Technical Physics*. 2023, vol. 68, no. 10, pp. 1390–1397. doi: 10.61011/TP.2023.10.57456.148-23
7. Nalimova S. S., Moshnikov V. A., Shomakhov Z. V., Kondratev V. M. Gas Sensors Based on Nanostructures of Binary and Ternary Oxide Systems. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2024, vol. 27, no. 2, pp. 105–118. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-105-118
8. Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Rybina A. A., Buzovkin S. S., Kalazhokov Z. H., Moshnikov V. A. Improving the Sensor Characteristics of Binary and Ternary Oxide Nanosystems. *Physical and Chemical Aspects of the Study of Custers, Nanostructures and Nanomaterials*. 2023, iss. 15, pp. 879–887. doi: 10.26456/pcascnn/2023.15.879
9. Nalimova S., Shomakhov Z. V., Moshnikov V. A. Binary and Ternary Oxide Nanostructured Multisystems for Gas Sensors. *Engineering Proceedings*. 2023, vol. 48, iss. 1, art. no. 47. doi: 10.3390/CSAC2023-14880
10. Ryabko A. A., Bobkov A. A., Nalimova S. S., Maksimov A. I., Levitskii V. S., Moshnikov V. A., Terukov E. I. Gas Sensitivity of Nanostructured Coatings Based on Zinc Oxide Nanorods under Combined Activation. *Technical Physics*. 2022, vol. 67, no. 5, pp. 644–649. doi: 10.21883/tp.2022.05.53683.314-21
11. Nalimova S. S., Maksimov A. I., Matyushkin L. B., Moshnikov V. A. Current State of Studies on Synthesis and Application of Zinc Stannate (Review). *Glass Physics and Chemistry*. 2019, vol. 45, no. 4, pp. 251–260. doi: 10.1134/S1087659619040096
12. Li Z., Xiong Y., Bi D., Liu Q., Yang C., Zhang J. Continuously Improved Gas-Sensing Performance of Zn<sub>2</sub>SnO<sub>4</sub> Porous Octahedrons by Structure Evolution And Further ZnSnO<sub>3</sub> Nanosheets Decoration. *J. of Alloys and Compounds*. 2022, vol. 901, art. no. 163744. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.163744
13. Chen B., Ouyang P., Li Y., Duan Y., Dong F. Application of ZnSn(OH)<sub>6</sub>-Based Nanomaterials in Environmental Photocatalysis. *Chemical Industry and Engineering Progress*. 2023, vol. 42, iss. 2, pp. 756–764. doi: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0646
14. Kim J. S., Kumar N., Jung U., Park J., Naushad Mu. Enhanced Photocatalytic Activity of Cubic ZnSn(OH)<sub>6</sub> by In-Situ Partial Phase Transformation Via Rapid Thermal Annealing. *Chemosphere*. 2023, vol. 331, art. no. 138780. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138780
15. Paul S., Barman S., Datta A. Zn-Based Oxide Perovskite Nanocomposites for Energy and Sensing Applications. *J. of Materials Science*. 2024, vol. 59, pp. 17968–17990. doi: 10.1007/s10853-024-09765-4
16. Rahman M., Bashar M. S., Rahman Md. L., Chowdhury F. I. Comprehensive Review of Micro/Nanostructured ZnSnO<sub>3</sub>: Characteristics, Synthesis, and Diverse Applications. *RSC Advances*. 2023, vol. 13, pp. 30798–30837. doi: 10.1039/d3ra05481k
17. Sun S., Liang S. Morphological Zinc Stannate: Synthesis, Fundamental Properties and Applications. *J. of Materials Chemistry A*. 2017, vol. 5, iss. 39, pp. 20534–20560. doi: 10.1039/C7TA06221D
18. Reid R. G., Prausnitz J., Sherwood T. *The Properties of Gases and Liquids*. New York, McGraw-Hill, 1977, 688 p.
19. Spivakovskij V. B. *Analilicheskaya himiya olava* [Analytical Chemistry of Tin]. Moscow, Nauka, 1975, 252 p. (In Russ.)
20. Fu X., Wang X., Ding Z., Leung D. Y. C., Zhang Z., Long J., Zhang W., Li Z., Fu X. Hydroxide ZnSn(OH)<sub>6</sub>: a Promising New Photocatalyst for Benzene Degradation. *Appl. Catalysis B: Environmental*. 2009, vol. 91, no. 1, pp. 67–72. doi: 10.1016/j.apcatb.2009.05.007
21. Dong S., Xia L., Zhang F., Li F., Wang Y., Cui L., Feng J., Sun J. Effects of pH Value and Hydrothermal Treatment on the Microstructure and Natural-Sunlight Photocatalytic Performance of ZnSn(OH)<sub>6</sub> Photocatalyst. *J. of Alloys and Compounds*. 2019, vol. 810, art. no. 151955. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.151955

22. Wang X., Zhu X., Tao T., Leng B., Xu W., Mao L. Structural Inheritance and Change from ZnSn(OH)<sub>6</sub> to ZnSnO<sub>3</sub> Compounds Used for Ethanol Sensors: Effects of Oxygen Vacancies, Temperature and UV on Gas-Sensing Properties. *J. of Alloys and Compounds*. 2020, vol. 829, art. no. 154445.

doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154445

23. Ren Z., Zhou D., Zhang L., Yu M., Wang Z., Fan Y., Zhang D., Zhang Q., Xie J. ZnSn(OH)<sub>6</sub> Photocatalyst for Methylene Blue Degradation: Electrolyte-

Dependent Morphology and Performance. *ChemistrySelect*. 2018, vol. 3, iss. 39, pp. 10849–10856.  
doi: 10.1002/slct.201802195

24. Pham M.-T., Tran H.-H., Nguyen T.-M. T., Bui D.-P., Huang Y., Cao J., You S.-J., Viet P. V., Nam V. H., Wang Y.-F. Revealing DeNO<sub>x</sub> and DeVOC Reactions via the Study of the Surface and Bandstructure of ZnSn(OH)<sub>6</sub> Photocatalysts. *Acta Materialia*. 2021, vol. 215, no. 4, art. no. 117068.

doi: 10.1016/j.actamat.2021.117068

### Information about the authors

**Alexander I. Maximov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2005), Associate Professor (2008), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: nanomaterials; metal oxides; photocatalysis; photovoltaics; gas sensors.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aimaximov@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0195-8870>

**Svetlana S. Nalimova**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2013), Associate Professor (2024), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: nanomaterials, gas sensors; metal oxides; transition metal dichalcogenides; van der Waals heterostructures; hydrothermal synthesis; sol-gel technology; solar cells.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: sskarpova@list.ru

<http://orcid.org/0000-0003-3065-3961>

**Ekaterina A. Levkevich**, Master in Electronics and Nanoelectronics (2020, Saint Petersburg Electrotechnical University). Engineer of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: nanomaterials; metal oxides; photocatalysis; gas sensing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: levek26@gmail.com

**Zamir V. Shomakhov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2012), Associate Professor (2022), Director of the Institute of Electronics, Robotics and Artificial Intelligence of Kabardino-Balkarian State University n. a. H. M. Berbekov. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: X-ray photoelectron spectroscopy; nanostructures; solar cells; semiconductor compounds; perovskites; defects; physico-chemical analysis.

Address: Kabardino-Balkarian State University n. a. H. M. Berbekov, 173, Chernyshevsky St., Nalchik 360004, Russia

E-mail: shozamir@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5738-2626>

**Svetlana A. Kirillova**, Master in Chemical Engineering and Biotechnology (Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2004), Senior Lecturer of the Department of Physical Chemistry of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: physicochemical analysis (thermal analysis, X-ray diffraction); chemical thermodynamics (experimental study and modeling of phase equilibria).

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: refractory-sveta@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-7912-6033>

**Vyacheslav A. Moshnikov**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1997), Professor (1999), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: colloidal quantum dots; sol-gel technology; hierarchical porous materials; biosensors; solar cells; photocatalysts.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

**Alexander V. Solomonov**, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2000), Professor (2002), Professor of Department of Micro- and Nanoelectronics Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 140 scientific publications. Area of expertise: microelectronics and optics of semiconductors; nanoelectronics; quantum-sized heterostructures.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6721-4159>