Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 538.9

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНСОРОВ ГАЗА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ОЛОВА В АТМОСФЕРЕ ПАРОВ ВОДЫ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

В.В. Симаков, И.В. Синёв, И.Д. Осыко, Е.А. Щербакова, А.И. Гребенников
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г.Чернышевского»,
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83
viatcheslav.simakov@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.591

Аннотация: Представлены результаты исследований циклических вольт-амперных характеристик сенсора газа на основе тонкой пленки диоксида олова в атмосфере паров воды при комнатной температуре. Показано, что при циклическом изменении напряжения на поверхности активного слоя газочувствительной структуры протекают электрохимические реакции окисления-восстановления. Отмечено, что потенциалы протекания окислительных и восстановительных реакций не зависят от концентрации газа в пробе и могут быть использованы для распознавания сорта анализируемого газа.
Ключевые слова: вольт-амперные характеристики, сенсоры газа, тонкие пленки, диоксид олова, комнатная температура, распознавание газовых смесей.

1. Введение

Системы детектирования многокомпонентных газовых смесей и запахов, включающие полупроводниковые сенсоры, устройства предварительной обработки сигналов, компоненты контроля и управления рабочим режимом технологических комплексов, могут быть сформированы на единой подложке методами микро- и нанотехнологий [1, 2]. Известно, что хемосорбция частиц газов из окружающей среды на поверхности полупроводниковых пленок, например, оксидов металлов, сопровождается обратимыми изменениями их проводимости [3-5]. Для полупроводниковых металлооксидных газовых сенсоров характерны низкая стоимость, малые габариты и энергопотребление, высокая, зачастую недостижимая в других методах анализа чувствительность к присутствию в окружающей атмосфере примесей различных газов [6-9], поэтому оксиды металлов (в том числе диоксид олова) являются перспективными материалами для создания сенсоров газа.

Однако полупроводниковые газовые сенсоры характеризуются низкой селективностью отклика на воздействие газовых проб [10]. Вследствие этого применение таких газочувствительных структур ограничивается анализом однокомпонентных газовых смесей. Существует ряд методов, позволяющих повысить селективность полупроводниковых газовых сенсоров и мультисенсорных систем на их основе, например, нанесение на поверхность активных слоев сенсоров тонких газоразделительных покрытий, анализ шумовых характеристик сенсоров, использование нестационарных температурных режимов и др. [11, 12].

Ожидается, что анализ циклических вольт-амперных характеристик сенсоров, измеренных в атмосфере анализируемых газов, позволит повысить селективность полупроводниковых металлоксидных газовых сенсоров и мультисенсорных систем на их основе.

Целью данной работы являлось исследование вольт-амперных характеристик газовых сенсоров на основе тонкой пленки диоксида олова при циклическом изменении измерительного напряжения в атмосфере паров воды при комнатной температуре.

2. Методика эксперимента

Слои диоксида олова формировались методом высокочастотного магнетронного распыления мишени SnO_2 в смеси аргона и кислорода [13, 14]. Пленки диоксида олова осаждались на поликоровую подложку, толщина слоев составляла порядка 400 нм (см. рис. 1 а). Поверх пленки диоксида олова через маску наносились платиновые контакты с межконтактным зазором 400 мкм (см. рис. 1 б).

Рис. 1. а – SEM (scanning electron microscope) изображение скола пленки SnO_2 , б – схематическое изображение газочувствительной структуры.

Исследования электрофизических свойств полученных газочувствительных структур проводились с использованием автоматизированного измерительного комплекса [15]. Вольт-амперные характеристики измерялись при циклическом изменении напряжения в диапазоне $-60...60$ В. Напряжение на газочувствительной структуре изменялось ступенчато с шагом 5 В каждые 60 с. Температура сенсоров и газовых проб во всех экспериментах поддерживалась на уровне 38°C термостатом ТС-1/80. Газовые пробы, содержащие пары воды, составлялись путем барботирования деионизованной воды потоком очищенного воздуха от генератора ГЧВ-1,2-3,5. Содержание паров воды в воздухе определялось соотношением потоков паровоздушной смеси и очищенного воздуха. Общий поток через измерительную камеру во всех экспериментах составлял 100 мл/мин.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики тонкой пленки диоксида олова в атмосфере паров воды с различной концентрацией, измеренные при циклическом изменении напряжения. Как видно из рис. 2, вольт-амперные характеристики, измеренные при циклическом изменении напряжения, носили нелинейный асимметричный характер.

В области низких напряжений от 0 В до 20 В вольт-амперные характеристики носили омический характер.

В диапазоне напряжений от 30 В до 40 В наблюдался максимум тока при напряжении ~ 45 В. Дальнейшее увеличение напряжения (> 50 В) приводило к уменьшению тока через образец. Следует отметить, что вольт-амперные характеристики газочувствительных структур в атмосфере паров воды при комнатной температуре имели гистерезис (см. рис. 2).

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики сенсора газа на основе тонкой пленки диоксида олова в атмосфере паров воды с концентрацией: а – 2,7 %, б – 3,1 %.

На рис. 3 представлена динамика установления тока при ступенчатом изменении напряжения на образце. Из рис. 3 видно, что в начальный момент времени ток через газочувствительную структуру увеличивался и за время порядка 10 с достигал своего максимального значения. Затем ток уменьшался и за время порядка 40 с выходил на стационарный уровень своего значения.

При увеличении количества циклов измерения вольт-амперных характеристик проводимость образца уменьшалась (см. рис. 2), однако положение максимума тока на прямых ветвях вольт-амперных характеристик оставалось практически неизменным (см. рис. 4) и наблюдалось при потенциалах порядка 45 В.

Рис. 3. Динамика установления тока при ступенчатом изменении напряжения на образце в атмосфере паров воды с концентрацией 2,7 %: а – цикл № 1, прямой ход, б – цикл № 5, обратный ход.

Рис. 4. Зависимость напряжения, при котором наблюдается максимум тока через газочувствительную структуру, от номера цикла измерений вольт-амперных характеристик.

Экспериментальные результаты анализируются в рамках модели смешанного (электронно-ионного) транспорта заряда в газочувствительных структурах [16]. Предполагается, что на поверхности активного слоя сенсора адсорбированные молекулы воды диссоциируют (1), и при наложении внешнего поля гидроксильные группы и протоны дрейфуют к соответствующим электродам. В приэлектродной области адсорбированные ионы восстанавливаются (2) или окисляются (3), захватывая или инжектируя электроны из объема газочувствительного слоя, а затем десорбируются в газовую фазу:

Дрейф ионов вдоль поверхности слоя вызывает неравномерное распределение электронов и адсорбированных частиц газа, что приводит к перераспределению адсорбционных и десорбционных потоков: адсорбция и десорбция частиц из газовой фазы происходит преимущественно в приэлектродных областях газочувствительной структуры. Вследствие более низкой подвижности ионных носителей заряда по сравнению с электронами приэлектродные области обладают более высоким сопротивлением, так как эти области обеднены электронами. Поэтому ток через образец контролируется скоростью захвата и инжекции электронов с локализованных уровней, индуцированных адсорбированными частицами газа [17, 18]. При повышении напряжения ширина обедненных электронами приконтактных областей с высоким сопротивлением увеличивается, что приводит к уменьшению тока через образец.

Ассиметрия прямых и обратных ветвей вольт-амперных характеристик может быть связана с неравномерным распределением адсорбированных частиц анализируемого газа на поверхности при изменении полярности приложенного напряжения. По-видимому, при измерении обратных ветвей вольт-амперных характеристик (от 0 В до –60 В) ионы на поверхности активного слоя сенсора не успевают переместиться к противоположному контакту за время выдержки напряжения на заданном уровне [19-21].

Предполагается, что при анализе многокомпонентных газовых смесей на вольт-амперных характеристиках сенсоров будут наблюдаться несколько экстремумов тока, соответствующих основным компонентам смеси. Это открывает перспективу распознавания газов путем анализа электрофизических характеристик сенсоров в атмосфере анализируемой газовой смеси.

4. Заключение

Таким образом, в работе проведено исследование влияния паров воды на электрофизические свойства сенсора газа на основе тонкой пленки диоксида олова. Показано, что в атмосфере паров воды при циклическом изменении напряжения происходит изменение проводимости активного слоя сенсора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00821).

Библиографический список:

1. **Graf, M.** Microfabricated gas sensor systems with sensitive nanocrystalline metal-oxide films / M. Graf, A. Gurlo, N. Bârsan, U. Weimar, A. Hierlemann // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2006. – V. 8. – I. 6. – P. 823-839.
2. **Simon, I.** Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance / I. Simon, N. Barsan, M. Bauer, U. Weimar // *Sensors and Actuators B*. – 2001. – V. 73. – I. 1. – P. 1-26.
3. **Пронин, И.А.** Перколяционная модель газового сенсора на основе полупроводниковых оксидных наноматериалов с иерархической структурой пор / И.А. Пронин, И.А. Аверин, В.А. Мошников и др. // *Нано- и микросистемная техника*. – 2014. – № 9 (170). – С. 15-19.
4. **Мясников, И.А.** Полупроводниковые сенсоры в физико-химических исследованиях / И.А. Мясников, В.Я. Сухарев, Л.Ю. Куприянов, С.А. Завьялов. – М: Наука, 1991. – 327 с.
5. **Симаков, В.В.** Распознавание запахов дыма на основе анализа динамики отклика мультисенсорной микросистемы / В.В. Симаков, А.С. Ворошилов, В.В. Галушка и др. // *Нано- и микросистемная техника*. – 2012. – № 9 (146). – С. 49-54.
6. **Васильев, А.А.** Газовые сенсоры для пожарных извещателей / А.А. Васильев, И.М. Олихов, А.В. Соколов // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2005. – № 2 (60). – С. 24-27.
7. **Аверин, И.А.** Исследование газочувствительности сенсоров на основе наноструктурированных композиционных материалов SiO_2-SnO_2 / И.А. Аверин, И.А. Пронин, А.А. Карманов // *Нано- и микросистемная техника*. – 2013. – № 5 (154). – С. 23-26.
8. **Рембеза, С.И.** Влияние оптического излучения на адсорбционные процессы взаимодействия газов-восстановителей с пленкой SnO_2 / С.И. Рембеза, Т.В. Свистова, Н.Н. Кошелева и др. // *Письма в Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 41. – Вып. 23. – С. 32-39.
9. **Kisin, V.V.** A three-electrode gas sensor / V.V. Kisin, S.A. Voroshilov, V.V. Sysoev, et al. // *Приборы и техника эксперимента*. – 1995. – Т. 38. – № 5. – С. 178-181.
10. **Симаков, В.В.** Влияние паров воды и освещения на проводимость тонких пленок диоксида олова при комнатной температуре / В.В. Симаков, И.В. Синев, А.В. Смирнов и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2017. – Вып. 9. – С. 449-454.
11. **Simakov, V.** Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for SnO_2 / V. Simakov, A. Voroshilov, A. Grebennikov et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2009. – V. 137. – I. 2. – P. 456-461.
12. **Синев, И.В.** Влияние предварительного нагрева на распознавательную способность мультисенсорной микросистемы / И.В. Синев, А.В. Смирнов, А.И. Гребенников и др. // *Нано- и микросистемная техника*. – 2014. – № 1 (162). – С. 52-55.
13. **Симаков, В.В.** Влияние температуры на скорость роста нитевидных нанокристаллов диоксида олова, сформированных методом физического осаждения из парогазовой фазы / В.В. Симаков, И.В. Синёв, А.В. Смирнов и др. // *Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 86. – Вып. 4. – С. 96-100.
14. **Симаков, В.В.** Формирование пленок диоксида олова с вертикально ориентированными нанопорами / В.В. Симаков, И.В. Синев, А.В. Смирнов и др. //

Нанотехника. – 2011. – № 3 (27). – С. 45-46.

15. **Симаков, В.В.** Аппаратно-программный комплекс многопараметрического распознавания многокомпонентных газовых смесей на основе мультисенсорных микросистем / В.В. Симаков, Л.В. Никитина, И.В. Синёв // Башкирский химический журнал. – 2010. – Т. 17. – № 5. – С. 125-127.

16. **Ефанова, В.В.** Гетеропереходы в твердофазной электрохимической системе прямого контакта Li –анода с органическим полупроводником / В.В. Ефанова, С.Г. Калашникова, А.М. Михайлова и др. // Электрохимия. – 2003. – Т. 39. – № 5. – С. 646-650.

17. **Михайлова, А.М.** Исследование твердофазной короткозамкнутой системы Li /полимерный полиакрилонитриловый композит для ХИТ / А.М. Михайлова, Н.И. Васильченко, С.Г. Калашникова и др. // Электрохимическая энергетика. – 2003. – Т. 3. – № 4. – С. 204-210.

18. **Обвинцева, Л.А.** Полупроводниковые металлоксидные сенсоры для определения химически активных примесей в воздушной среде / Л.А. Обвинцева // Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52. – № 2. – С. 113-121.

19. **Nayral, C.** Synthesis and use of a novel SnO_2 nanomaterial for gas sensing / C. Nayral, E. Viala, et al. // Applied Surface Science. – 2000. – V. 164. – I. 1-4. – P. 219-226.

20. **Liess, M.** Electric-field-induced migration of chemisorbed gas molecules on a sensitive film – a new chemical sensor / M. Liess // Thin Solid Films. – 2002. – V. 410. – I. 1-2. – P. 183-187.

21. **Симаков, В.В.** Влияние температуры на вольт-амперные характеристики тонкопленочных газочувствительных структур / В.В. Симаков, О.В. Якушева, А.И. Гребенников и др. // Письма в Журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – Вып. 2. – С. 1-7.

References:

1. **Graf, M.** Microfabricated gas sensor systems with sensitive nanocrystalline metal-oxide films / M. Graf, A. Gurlo, N. Bârsan, U. Weimar, A. Hierlemann // Journal of Nanoparticle Research. – 2006. – V. 8. – I. 6. – P. 823-839.

2. **Simon, I.** Micromachined metal oxide gas sensors: opportunities to improve sensor performance / I. Simon, N. Barsan, M. Bauer, U. Weimar // Sensors and Actuators B. – 2001. – V. 73. – I. 1. – P. 1-26.

3. **Pronin, I.A.** Perkolyacionnaya model' gazovogo sensora na osnove poluprovodnikovyh oksidnyh nanomaterialov s ierarhicheskoj strukturoj por / I.A. Pronin, I.A. Averin, V.A. Moshnikov i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. – 2014. – no. 9 (170). – P. 15-19.

4. **Myasnikov, I.A.** Poluprovodnikovye sensory v fiziko-himicheskikh issledovaniyah / I.A. Myasnikov, V.Ya. Sukharev, L.Yu. Kupriyanov, S.A. Zav'yalov. – M: Nauka, 1991. – 327 p.

5. **Simakov, V.V.** Raspoznavanie zapahov dyma na osnove analiza dinamiki otklika mul'tisensornoj mikrosistemy / V.V. Simakov, A.S. Voroshilov, B.V. Galushka i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. – 2012. – no. 9 (146). – P. 49-54.

6. **Vasilyev, A.A.** Gazovye sensory dlya pozharnyh izveshchatelej / A.A. Vasilyev, I.M. Olikhov, A.V. Sokolov // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes. – 2005. – no. 2 (60). – P. 24-27.

7. **Averin, I.A.** Issledovanie gazochuvstvitel'nosti sensorov na osnove nanostrukturirovannyh kompozicionnyh materialov $SiO_2 - SnO_2$ / I.A. Averin, I.A. Pronin, A.A. Karmanov // Nano-

- i mikrosistemnaya tekhnika. – 2013. – no 5 (154). – P. 23-26.
8. **Rembeza, S.I.** Vliyanie opticheskogo izlucheniya na adsorbcionnye processy vzaimodejstviya gazov-vosstanovitelej s plenkoj SnO_2 / S.I. Rembeza, T.V. Svistova, N.N. Kosheleva i dr. // Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2015. – V. 41. – I. 23. – P. 32-39.
9. **Kisin, V.V.** A three-electrode gas sensor / V.V. Kisin, S.A. Voroshilov, V.V. Sysoev, et al. // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 1995. – V. 38. – no. 5. – P. 178-181.
10. **Simakov, V.V.** Vliyanie parov vody i osveshcheniya na provodimost' tonkih plenok dioksida olova pri komnatnoj temperature / V.V. Simakov, I.V. Sinev, A.V. Smirnov i dr. // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2017. – I. 9. – P. 449-454.
11. **Simakov, V.** Gas identification by quantitative analysis of conductivity-vs-concentration dependence for SnO_2 / V. Simakov, A. Voroshilov, A. Grebennikov et al. // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2009. – V. 137. – I. 2. – P. 456-461.
12. **Sinev, I.V.** Vliyanie predvaritel'nogo nagreva na raspoznavatel'nyuyu sposobnost' mul'tisensornoj mikrosistemy / I.V. Sinev, A.V. Smirnov, A.I. Grebennikov i dr. // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. – 2014. – no. 1 (162). – P. 52-55.
13. **Simakov, V.V.** Vliyanie temperatury na skorost' rosta nitevidnyh nanokristallov dioksida olova, sformirovannyh metodom fizicheskogo osazhdeniya iz parogazovoy fazy / V.V. Simakov, I.V. Sinev, A.V. Smirnov i dr. // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2016. – V. 86. – I. 4. – P. 96-100.
14. **Simakov, V.V.** Formirovanie plenok dioksida olova s vertikal'no orientirovannymi nanoporami / V.V. Simakov, I.V. Sinev, A.V. Smirnov i dr. // Nanotekhnika. – 2011. – no. 3 (27). – P. 45-46.
15. **Simakov, V.V.** Apparatno-programmnyj kompleks mnogoparametricheskogo raspoznavaniya mnogokomponentnyh gazovyh smesey na osnove mul'tisensornyh mikrosistem / V.V. Simakov, L.V. Nikitina, I.V. Sinev // Bashkirskij himicheskij zhurnal. – 2010. – V. 17. – no. 5. – P. 125-127.
16. **Efanova, V.V.** Geteroperekhody v tverdogaznoj elektrohimicheskoy sisteme pryamogo kontakta anoda s organicheskim poluprovodnikom / V.V. Efanova, S.G. Kalashnikova, A.M. Mikhaylova i dr. // Elektrohimiya. – 2003. – V. 39. – no. 5. – P. 646-650.
17. **Mikhaylova, A.M.** Issledovanie tverdogaznoj korotkozamknutoj sistemy Li/polimernyj poliakrilonitrilovyj kompozit dlya HIT / A.M. Mikhaylova, N.I. Vasil'chenko, S.G. Kalashnikova i dr. // Elektrohimicheskaya energetika. – 2003. – V. 3. – no. 4. – P. 204-210.
18. **Obvinceva, L.A.** Poluprovodnikovye metalloksidnye sensory dlya opredeleniya himicheskii aktivnyh primesej v vozduшной srede / L.A. Obvinceva // Rossijskij himicheskij zhurnal. – 2008. – V. 52. – no. 2. – P. 113-121.
19. **Nayral, C.** Synthesis and use of a novel SnO_2 nanomaterial for gas sensing / C. Nayral, E. Viala, et al. // Applied Surface Science. – 2000. – V. 164. – I. 1-4. – P. 219-226.
20. **Liess, M.** Electric-field-induced migration of chemisorbed gas molecules on a sensitive film – a new chemical sensor / M. Liess // Thin Solid Films. – 2002. – V. 410. – I. 1-2. – P. 183-187.
21. **Simakov, V.V.** Vliyanie temperatury na vol't-ampernye harakteristiki tonkoplenochnykh gazochuvstvitel'nyh struktur / V.V. Simakov, O.V. Yakusheva, A.I. Grebennikov i dr. // Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2006. – V. 32. – I. 2. – P. 1-7.

**I – V CHARACTERISTICS OF GAS SENSORS BASED ON TIN DIOXIDE THIN FILMS
IN WET AIR AT ROOM TEMPERATURE**

V.V. Simakov, I.V. Sinev, I.D. Osyko, E.A. Shcherbakova, A.I. Grebennikov
Saratov State University

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.591

Annotation: In this work cyclical $I-V$ characteristics of a gas sensor based on tin dioxide thin films in wet air at room temperature has been studied. It was demonstrated that cyclical voltage variation leads to redox reactions on the surface of the gas sensor active layer. Redox reaction potential does not depend on the gas concentration in an analyzed gas probe. Therefore, the redox potential can be used as an identifying agent.

Keywords: $I-V$ characteristics, gas sensors, thin films, tin dioxide, room temperature, gas mixture identification.

Симаков Вячеслав Владимирович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, факультет нано- и биомедицинских технологий, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Синёв Илья Владимирович – к. ф.-м. н., доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, факультет нано- и биомедицинских технологий, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Осыко Ирина Дмитриевна – студент факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Щербакова Евгения Александровна – студент факультета нано- и биомедицинских технологий ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Гребенников Александр Иванович – заведующий лабораторией технологии материалов и покрытий, старший преподаватель кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, факультет нано- и биомедицинских технологий, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Viacheslav V. Simakov – Dr. Sc., Professor, Department of Material Sciences and Technologies and Quality Management, Saratov State University

Iliya V. Sinev – Ph. D., Docent, Department of Material Sciences and Technologies and Quality Management, Saratov State University

Irina D. Osyko – student, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Saratov State University

Evgeniya A. Shcherbakova – student, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Saratov State University

Alexander I. Grebennikov – Head of Coating and Materials engineering research laboratory, Senior Lecturer of Department of Material Sciences and Technologies and Quality Management, Faculty of Nano- and Biomedical Technologies, Saratov State University