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**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

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 журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров 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. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

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

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 661.871

Оригинальная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКТИВНОЙ КИСЛОТНОСТИ СРЕДЫ НА СТАБИЛЬНОСТЬ НАНОЧАСТИЦ MnO_2

А.В. Блинов¹, Д.Г. Маглакелидзе¹, А.А. Кравцов^{1,2}, А.А. Блинова¹, А.А. Гвозденко¹,
А.Б. Голик¹, В.В. Раффа¹, Е.В. Коновалова¹

¹ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

²ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук»

344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

nastya_bogdanova_88@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.033

Аннотация: В работе впервые представлены результаты исследования микроструктуры наночастиц диоксида марганца, стабилизированных серосодержащими аминокислотами. По результатам сканирующей электронной микроскопии обнаружено наличие в образцах наночастиц диаметром 15–30 нм. С помощью спектрофотометрии установлены оптимальные массовые соотношения прекурсоров для получения стабильных золь наночастиц диоксида марганца, которые составляют $KMnO_4$: метионин – 1:1 и $KMnO_4$: цистеин – 3:1. Исследование влияния активной кислотности среды на стабильность наночастиц диоксида марганца показало, что образцы MnO_2 , полученные с использованием метионина, стабильны при $4 \leq pH \leq 11$, а с использованием цистеина стабильны при $5 \leq pH \leq 8$.

Ключевые слова: активная кислотность среды, диоксид марганца, наночастицы, спектрофотометрия.

1. Введение

За последние десятилетия наночастицы диоксида марганца получили широкое распространение в различных областях науки и техники. Наночастицы MnO_2 и композиты на их основе, применяются в электронике как материал для суперконденсаторов [1]; в медицине – как системы адресной доставки лекарств, также в химиотерапии для лечения различных форм злокачественных новообразований [2-7], в химической промышленности – в качестве катализаторов [8, 9] и многое другое. К настоящему времени разработано множество методик синтеза наноразмерного MnO_2 . Так, наночастицы диоксида марганца и их композиты могут быть синтезированы сонохимическим методом [10, 11], методами зеленого синтеза [12, 13], селективного синтеза наночастиц диоксида марганца [14] и другими. В связи с этим, актуальным является получение и исследование физико-химических и оптических параметров препаратов, содержащих наночастицы MnO_2 . Цель данной работы – синтезировать наноразмерный диоксид марганца, стабилизированный серосодержащими аминокислотами, исследовать влияние активной кислотности среды на агрегативную устойчивость полученных образцов.

2. Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Синтез наночастиц диоксида марганца осуществляли методом химического восстановления в водной среде. На первой стадии взвешивали на аналитических весах 0,005 г серосодержащей аминокислоты (метионина или цистеина). Затем ее количественно переносили в колбу на 200 мл и добавляли дистиллированную воду, полученный раствор перемешивали в течение 10 минут на электромагнитной мешалке. На втором этапе взвешивали на аналитических весах 0,005 г перманганата калия и также количественно переносили в колбу на 200 мл, добавляли дистиллированную воду. На третьем этапе проводили смешивание двух приготовленных растворов в различных соотношениях.

Для изучения морфологии наночастиц диоксида марганца использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ). Исследование проводили на сканирующем электронном микроскопе MIRA-LMN с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standart/X-max 20 (standard) («Tescan», Чехия). Согласно данным СЭМ (см. рис. 1) синтезированные образцы представляют собой наночастицы сферической формы. Диапазон размеров наночастиц MnO_2 для образца, полученного с использованием цистеина составил 16,4–22,5 нм, а для образца с метионином – от 41,5 до 72,4 нм.

Рис. 1. СЭМ-изображения наночастиц диоксида марганца, синтезированных в среде цистеина (а) и метионина (б).

На следующем этапе проводили исследование влияния массового соотношения перманганата калия и серосодержащей аминокислоты на процесс восстановления $KMnO_4$ с формированием наночастиц диоксида

марганца. Для этого была подготовлена серия образцов с различным массовым соотношением реагентов (прекурсор : восстановитель), которое варьировалось от 1:5 до 5:1. Полученные образцы исследовали с помощью спектрофотометрии на спектрометре UNICO 2802 (USA). Измерения спектров поглощения наночастиц диоксида марганца проводили относительно дистиллированной воды. Диапазон измерения составлял от 200 нм до 1100 нм с шагом сканирования 1 нм. Полученные данные представлены на рис. 2 и 3.

Рис. 2. Влияние массовых соотношений $KMnO_4$ к метионину: 1 – 1:5, 2 – 1:4, 3 – 1:3, 4 – 1:2, 5 – 1:1, 6 – 2:1, 7 – 3:1, 8 – 4:1, 9 – 5:1.

Анализ рис. 2 показал, что максимум интенсивности полосы поглощения соответствует массовому соотношению $KMnO_4$: метионин – 1:1. При массовых соотношениях $KMnO_4$: метионин от 1:5 до 1:2 присутствует полоса поглощения в области 350 нм меньшей интенсивности. В образцах с массовыми соотношениями от 2:1 до 5:1 полоса поглощения смещается в область 320–340 нм, а также появляется дополнительная полоса поглощения в области 500–580 нм, соответствующие электронным переходам в перманганат-ионе MnO_4^- . При изменении массового соотношения от 1:5 до 1:2 интенсивность дополнительной полосы поглощения в области 500–580 нм уменьшается и при соотношении $KMnO_4$: метионин – 1:1 полосы отсутствуют, что соответствует формированию MnO_2 при восстановлении MnO_4^- .

Из рис. 3 видно, что при соотношениях $KMnO_4$: цистеин от 1:5 до 2:1 отсутствует полоса поглощения в области 350 нм, что свидетельствует об отсутствии в полученных образцах наночастиц диоксида марганца. В

образцах с массовыми соотношениями 3:1, 4:1 и 5:1 присутствует полоса поглощения в области 350 нм, что связано с образованием наночастиц диоксида марганца и полным восстановлением $KMnO_4$. Оптимальное массовое соотношение $KMnO_4$: цистеин – 4:1.

Рис. 3. Влияние массовых соотношений $KMnO_4$ к цистеину: 1 – 5:1, 2 – 4:1, 3 – 3:1, 4 – 2:1, 5 – 1:1, 6 – 1:2, 7 – 1:3, 8 – 1:4, 9 – 1:5.

На следующем этапе проводили исследование влияния активной кислотности среды на полученные образцы наночастиц MnO_2 , стабилизированные метионином или цистеином. Активную кислотность среды pH варьировали от 2 до 12, кислую среду создавали с помощью растворов азотной кислоты, а щелочную – гидроксидом натрия. Полученные данные представлены на рис. 4 и 5. Анализ данных, представленных на рис. 4, показал, что в образцах наноразмерного MnO_2 с активной кислотностью $4 \leq pH \leq 11$ присутствует полоса поглощения, соответствующая полупроводниковым наночастицам диоксида марганца. Установлено, что интенсивность данной полосы поглощения уменьшается при увеличении pH с 5 до 12, что свидетельствует о снижении агрегативной устойчивости образцов MnO_2 . Максимальная интенсивность полосы 350 нм наблюдается в образце с активной кислотностью среды, равной 5. Показано, что при понижении значений активной кислотности pH с 5 до 2 происходит уменьшение интенсивности полосы поглощения, что свидетельствует о растворении наночастиц MnO_2 в кислых средах.

Анализ рис. 5 показал, что наночастицы MnO_2 , полученные с использованием цистеина в качестве стабилизатора, устойчивы при

$5 \leq pH \leq 8$, так как в спектрах данных образцов присутствует полоса поглощения, соответствующая полупроводниковым наночастицам диоксида марганца.

Рис. 4. Зависимость влияния активной кислотности среды (указана цифрами) на интенсивность поглощения образцов MnO_2 , полученных с использованием метионина.

Рис. 5. Зависимость влияния активной кислотности среды (указана цифрами) на интенсивность поглощения образцов MnO_2 , полученных с использованием цистеина.

Установлено, что интенсивность данной полосы поглощения уменьшается при увеличении pH с 8 до 12, что свидетельствует о снижении агрегативной устойчивости и коагуляции частиц в образцах

MnO_2 . При значениях активной кислотности среды $2 \leq pH \leq 5$ происходит растворение частиц диоксида марганца с образованием истинного раствора, содержащего положительные двухзарядные ионы марганца Mn^{2+} .

3. Заключение

В результате анализа полученных данных показано, что серосодержащие аминокислоты могут применяться для получения золей, содержащих наноразмерный MnO_2 . Так же установлено, что оптимальным стабилизатором для синтеза наночастиц диоксида марганца, обеспечивающим получение стабильных в широком интервале активной кислотности среды золей, является серосодержащая аминокислота – метионин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект СП-1191.2019.4).

Библиографический список:

1. **Ren, Y.** Functionalization of biomass carbonaceous aerogels: selective preparation of MnO_2 @CA a composites for supercapacitors / Y. Ren, Q. Xu, J. Zhang, et. al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2014. – V. 6. – I. 12. – P. 9689-9697. DOI: 10.1021/am502035g.
2. **Yuan, L.** Flexible solid-state supercapacitors based on carbon nanoparticles/ MnO_2 nanorods hybrid structure / L. Yuan, X-H. Lu, X. Xiao, et. al. // ACS Nano. – 2012. – V. 6. – I. 1. – P. 656-661. DOI: 10.1021/nn2041279.
3. **Xiong, Y.** Synthesis of honeycomb MnO_2 nanospheres/carbon nanoparticles/graphene composites as electrode materials for supercapacitors / Y. Xiong, M. Zhou, H. Chen, et. al. // Applied Surface Science. – 2015. – V. 357. – Part A. – P. 1024-1030. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.09.111.
4. **Nagamuthu, S.** Biopolymer-assisted synthesis of λ - MnO_2 nanoparticles as an electrode material for aqueous symmetric supercapacitor devices / S. Nagamuthu, S. Vijayakumar, G. Muralidharan // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2013. – V. 52. – P. 18262-18268. DOI: 10.1021/ie402661p.
5. **Cao, J.** Recent progress in synergistic chemotherapy and phototherapy by targeted drug delivery systems for cancer treatment / J. Cao, Z. Chen, J. Chi, Y. Sun, Y. Sun // Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology. – 2018. – V. 46. – I. Supplement 1. – P. 817-830. DOI: 10.1080/21691401.2018.1436553.
6. **Cheng, M.** Monodisperse hollow MnO_2 with biodegradability for efficient targeted drug delivery / M. Cheng, Y. Yu, W. Huang, et. al. // ACS Biomaterials Science and Engineering. – 2020. – V. 6. – I. 9. – P. 4985-4992 DOI: 10.1021/acsbiomaterials.0c00507.
7. **Choi, C.A.** Redox- and pH -responsive fluorescent carbon nanoparticles- MnO_2 -based FRET system for tumor-targeted drug delivery in vivo and in vitro / C.A. Choi, J.E. Lee, Z.A.I. Mazrad, et. al. // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2018. – V. 63.

– P. 208-219. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.02.017.

8. **Hu, Z.** Ultrafine MnO_2 nanoparticles decorated on graphene oxide as a highly efficient and recyclable catalyst for aerobic oxidation of benzyl alcohol / Z. Hu, Y. Zhao, J. Liu, et. al. // Journal of colloid and Interface Science. – 2016. – V. 483. – P. 26-23. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.08.010.

9. **Kim, S.H.** MnO_2 nanowire– CeO_2 nanoparticle composite catalysts for the selective catalytic reduction of NO_x with NH_3 / S.H. Kim, B.C. Park, Y.S. Jeon, Y.K. Kim // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2018. – V. 10. – I. 38. – P. 32112-32119. DOI: 10.1021/acsami.8b09605.

10. **Zhu, S.** Synthesis of MnO_2 nanoparticles confined in ordered mesoporous carbon using a sonochemical method / S. Zhu, H. Zhou, M. Hibino, I. Honma, M. Ichihara // Advanced Functional Materials. – 2005. – V. 15. – I. 3. – P. 381-386. DOI: 10.1002/adfm.200400222.

11. **Zhu, S.** Synthesis of mesoporous amorphous MnO_2 from SBA-15 via surface modification and ultrasonic waves / S. Zhu, Z. Zhou, D. Zhang, H. Wang // Microporous and Mesoporous Materials. – 2006. – V. 95. – I. 1-3. – P. 257-264. DOI: 10.1016/j.micromeso.2006.05.029.

12. **Hoseinpour, H.** Green synthesis, characterization, and photocatalytic activity of manganese dioxide nanoparticles / V. Hoseinpour, M. Souiri, N. Ghaemi // Micro and Nano Letters. – 2018. – V. 13. – I. 11. – P. 1560-1563. DOI: 10.1049/mnl.2018.5008.

13. **Moon, S.A.** Biological synthesis of manganese dioxide nanoparticles by *Kalopanax pictus* plant extract / S.A. Moon, B.K. Salunke, B. Alkotaini, E. Sathiyamoorthi, B.S. Kim // IET Nanobiotechnology. – 2015. – V. 9. – I. 4. – P. 220-225. DOI: 10.1049/iet-nbt.2014.0051.

14. **Jana, S.** Shape-selective synthesis, magnetic properties, and catalytic activity of single crystalline β - MnO_2 nanoparticles / S. Jana, S. Basu, S. Pande, S.K. Ghosh, T. Pal // Journal of Physical Chemistry C. – 2007. – V. 111. – I. 44. – P. 16272-16277. DOI: 10.1021/jp074803l.

References:

1. **Ren, Y.** Functionalization of biomass carbonaceous aerogels: selective preparation of MnO_2 @CA a composites for supercapacitors / Y. Ren, Q. Xu, J. Zhang, et. al. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2014. – V. 6. – I. 12. – P. 9689-9697. DOI: 10.1021/am502035g.

2. **Yuan, L.** Flexible solid-state supercapacitors based on carbon nanoparticles/ MnO_2 nanorods hybrid structure / L. Yuan, X-H. Lu, X. Xiao, et. al. // ACS Nano. – 2012. – V. 6. – I. 1. – P. 656-661. DOI: 10.1021/nn2041279.

3. **Xiong, Y.** Synthesis of honeycomb MnO_2 nanospheres/carbon nanoparticles/graphene composites as electrode materials for supercapacitors / Y. Xiong, M. Zhou, H. Chen, et. al. // Applied Surface Science. – 2015. – V. 357. – Part A. – P. 1024-1030. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.09.111.

4. **Nagamuthu, S.** Biopolymer-assisted synthesis of λ - MnO_2 nanoparticles as an electrode material for aqueous symmetric supercapacitor devices / S. Nagamuthu, S. Vijayakumar, G. Muralidharan // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2013. – V. 52. – P. 18262-18268. DOI: 10.1021/ie402661p.

5. **Cao, J.** Recent progress in synergistic chemotherapy and phototherapy by targeted drug delivery systems for cancer treatment / J. Cao, Z. Chen, J. Chi, Y. Sun, Y. Sun // Artificial

- Cells, Nanomedicine, and Biotechnology. – 2018. – V. 46. – I. Supplement 1. – P. 817-830. DOI: 10.1080/21691401.2018.1436553.
6. **Cheng, M.** Monodisperse hollow MnO_2 with biodegradability for efficient targeted drug delivery / M. Cheng, Y. Yu, W. Huang, et. al. // ACS Biomaterials Science and Engineering. – 2020. – V. 6. – I. 9. – P. 4985-4992 DOI: 10.1021/acsbiomaterials.0c00507.
7. **Choi, C.A.** Redox- and pH -responsive fluorescent carbon nanoparticles- MnO_2 -based FRET system for tumor-targeted drug delivery in vivo and in vitro / C.A. Choi, J.E. Lee, Z.A.I. Mazrad, et. al. // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2018. – V. 63. – P. 208-219. DOI: 10.1016/j.jiec.2018.02.017.
8. **Hu, Z.** Ultrafine MnO_2 nanoparticles decorated on graphene oxide as a highly efficient and recyclable catalyst for aerobic oxidation of benzyl alcohol / Z. Hu, Y. Zhao, J. Liu, et. al. // Journal of colloid and Interface Science. – 2016. – V. 483. – P. 26-23. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.08.010.
9. **Kim, S.H.** MnO_2 nanowire- CeO_2 nanoparticle composite catalysts for the selective catalytic reduction of NO_x with NH_3 / S.H. Kim, B.C. Park, Y.S. Jeon, Y.K. Kim // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2018. – V. 10. – I. 38. – P. 32112-32119. DOI: 10.1021/acsami.8b09605.
10. **Zhu, S.** Synthesis of MnO_2 nanoparticles confined in ordered mesoporous carbon using a sonochemical method / S. Zhu, H. Zhou, M. Hibino, I. Honma, M. Ichihara // Advanced Functional Materials. – 2005. – V. 15. – I. 3. – P. 381-386. DOI: 10.1002/adfm.200400222.
11. **Zhu, S.** Synthesis of mesoporous amorphous MnO_2 from SBA-15 via surface modification and ultrasonic waves / S. Zhu, Z. Zhou, D. Zhang, H. Wang // Microporous and Mesoporous Materials. – 2006. – V. 95. – I. 1-3. – P. 257-264. DOI: 10.1016/j.micromeso.2006.05.029.
12. **Hoseinpour, H.** Green synthesis, characterization, and photocatalytic activity of manganese dioxide nanoparticles / V. Hoseinpour, M. Souri, N. Ghaemi // Micro and Nano Letters. – 2018. – V. 13. – I. 11. – P. 1560-1563. DOI: 10.1049/mnl.2018.5008.
13. **Moon, S.A.** Biological synthesis of manganese dioxide nanoparticles by *Kalopanax pictus* plant extract / S.A. Moon, B.K. Salunke, B. Alkotaini, E. Sathiyamoorthi, B.S. Kim // IET Nanobiotechnology. – 2015. – V. 9. – I. 4. – P. 220-225. DOI: 10.1049/iet-nbt.2014.0051.
14. **Jana, S.** Shape-selective synthesis, magnetic properties, and catalytic activity of single crystalline β - MnO_2 nanoparticles / S. Jana, S. Basu, S. Pande, S.K. Ghosh, T. Pal // Journal of Physical Chemistry C. – 2007. – V. 111. – I. 44. – P. 16272-16277. DOI: 10.1021/jp074803l.

Original paper

INFLUENCE OF ACTIVE ACIDITY OF THE MEDIUM ON THE STABILITY OF MnO_2 NANOPARTICLES

A.V. Blinov¹, D.G. Maglakelidze¹, A.A. Kravtsov^{1,2}, A.A. Blinova¹, A.A. Gvozdenko¹, A.B. Golik¹,
V.V. Raffa¹, E.V. Kononova¹

¹North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

²Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.033

Abstract: In this work, for the first time the results of studying the microstructure of manganese dioxide nanoparticles stabilized with sulfur-containing amino acids are presented. According to the results of scanning electron microscopy, nanoparticles with a diameter of 15–30 nm were presented in the samples. The optimal mass ratios of precursors were established by means of

spectrophotometry, to obtain stable sols of manganese dioxide nanoparticles. The optimal mass ratios were: $KMnO_4$: methionine – 1:1 and $KMnO_4$: cysteine – 3:1. Investigation of the effect of the medium active acidity on the stability of manganese dioxide nanoparticles showed that MnO_2 samples obtained with methionine are stable at $4 \leq pH \leq 11$, and with cysteine – at $5 \leq pH \leq 8$.

Keywords: active acidity of the medium, manganese dioxide, nanoparticles, spectrophotometry.

Блинов Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Маглакелидзе Давид Гурамиевич – студент 1 курса кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Кравцов Александр Александрович – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ электроники и фотоники, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук; научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории керамики и технохимии научно-лабораторного комплекса чистых зон Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Блинова Анастасия Александровна – к.т.н., доцент кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Гвозденко Алексей Алексеевич – студент 3 курса кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Голик Алексей Борисович – студент 3 курса кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Раффа Владислав Викторович – студент 2 курса кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Коновалова Екатерина Васильевна – студент 1 курса, кафедры электроники и нанотехнологий Инженерного института, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Andrey. V. Blinov – Senior Lecturer of the Department of Electronics and Nanotechnology of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Maglakelidze David Guramievich – 1st year student of the Department of Electronics and Nanotechnology of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Alexander A. Kravtsov – Ph. D., Senior Researcher of the Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences; Researcher, Research Laboratory of Ceramics and Technochemistry, Researcher, Research Laboratory of Ceramics and Technochemistry, Research and Laboratory Complex of Clean Zones of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Anastasiya A. Blinova – Ph. D., Docent of the Department of Electronics and Nanotechnology of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Aleksey A. Gvozdenko – 3rd year student of the Department of Electronics and Nanotechnology of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Aleksey B. Golik – 3rd student of the Department of Electronics and Nanotechnology of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Vladislav V. Raffa – 2nd year student of the Department of Electronics and Nanotechnology of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Ekaterina V. Konovalova – 1st student of the Department of Electronics and Nanotechnology of the Engineering Institute, North Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 25.08.2020; после рецензирования/revised: 14.09.2020; принята/accepted 21.09.2020.