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**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 11

ТВЕРЬ 2019

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:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2019. – Вып. 11. – 680 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 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. Сборник 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, 2019

© Тверской государственнй университет, 2019

УПРАВЛЕНИЕ ТЕКСТУРНЫМИ СВОЙСТВАМИ НАНОПОРОШКОВ SiO_2 , $\text{SiO}_2 - \text{MnO}_2$, CaF_2

О.А. Злыгостева^{1,2}, С.Ю. Соковнин^{1,2}, В.Г. Ильвес²

¹ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

ФГБУН «Институт электрофизики Уральского отделения

Российской академии наук»

620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

zlygosteva13@mail.ru, sokovnin@iep.uran.ru, ilves@iep.uran.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.582

Аннотация: Физические и химические свойства наноматериалов зависят не только от природы вещества, но также от размера и формы частиц, а также размера и формы пор. В работе исследуются способы управления текстурными свойствами нанопорошков SiO_2 , $\text{SiO}_2 - \text{MnO}_2$, CaF_2 , полученных импульсным испарением электронным пучком в вакууме, за счет допирования на этапе получения, ультразвуковой обработки водных суспензий нанопорошков и облучения нанопорошков релятивистскими электронами.
Ключевые слова: управление свойствами, пористость, нанопорошок, диоксид кремния, фториды.

1. Введение

Применение нанопорошков (НП) напрямую зависит от их физико-химических свойств, в особенности от текстурных свойств, таких как площадь удельной поверхности, размер наночастиц и их форма, а также размер, объем и форма пор НП [1]. Возможность управления этими параметрами НП позволит подбирать оптимальные свойства материалов и тем самым расширить сферы применения НП.

Важным развивающимся направлением применения НП является адресная доставка лекарственных веществ [2]. Особый интерес представляют мезопористые нанопорошки SiO_2 с межчастичной пористостью, которые позволяют инкапсулировать лекарство преимущественно в пористых структурах, а не на поверхности, что повышает возможный объем загружаемого лекарства. Загрузочная способность по объему НП определяется пористостью и площадью удельной поверхности [3].

Другими перспективными соединениями являются нанофториды щелочноземельных металлов, которые применяются в качестве катализаторов, материалов фотоники, в т.ч. прекурсоров оптической керамики, и материалов для биомедицинских применений.

Свойства НП существенно зависят от способов их получения. Можно выделить несколько групп способов получения НП, такие как химические, биологические и физические [4]. На сегодняшний день все

способы позволяют осуществлять управление текстурными свойствами НП при их получении, при этом химические методы отличаются большей производительностью и дешевизной. Важным преимуществом физических способов является отсутствие токсичных химических реагентов, адсорбированных в структуре, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на организм при медицинских применениях и вступать в реакции с лекарствами. В работе используется физический способ получения НП путем испарения мишеней импульсным электронным пучком (ИЭП) в газе низкого давления [5]. Данный метод позволяет испарять практически любые материалы в различных агрегатных состояниях, получать НП с высокой дефектностью структуры и достаточной химической чистотой, а также управлять текстурными свойствами НП за счет подбора основных параметров установки и режима испарения [6]. Помимо управления свойствами на этапе получения НП имеется ряд способов управления текстурными свойствами НП после синтеза. Целью настоящей работы является изучение различных способов управления текстурными свойствами мезопористых НП SiO_2 , $\text{SiO}_2 - \text{MnO}_2$, CaF_2 . В данной работе в качестве методов управления рассматривалось допирование основного материала на этапе приготовления мишеней для испарения в процессе получения НП, а также управление свойствами НП путем различных физических воздействий на готовые НП: внешней ультразвуковой обработки (УЗ) водных суспензий НП, нагрева и облучения НП релятивистскими электронами.

2. Эксперимент

Для исследования влияния допирования основного материала SiO_2 на текстурные свойства были изготовлены мишени с разной массовой концентрацией диоксида марганца MnO_2 0,1; 1; 3; 5 % для испарения методом ИЭП [7]. Удельная площадь поверхности (S_{BET}), объем ($V_{p\text{-total}}$) и размер ($D_{\text{ВН}}$) пор НП измерялись методом BET (Brunauer–Emmett–Teller) на установке Tristar 3000 V6.03 (Micrometrics, США).

Для исследования влияния УЗ на текстурные свойства SiO_2 и $\text{SiO}_2 - \text{MnO}_2$ НП были приготовлены водные суспензии путем добавления НП в дистиллированную воду с концентрацией НП 0,5–2 мг/мл. Образцы суспензий НП подвергались УЗ-обработке в ультразвуковой ванне ПСБ-2835-05 мощностью 100 Вт в течение $t_{\text{sc}} = 20, 40, 60, 100$ мин. После озвучивания образцы были центрифугированы на центрифуге Allegra X-30 Centrifuge (3000 об/мин, 10 мин.) для отделения НП от надосадочной жидкости, далее НП были высушены (при 40 °С) в течение 72 ч. Для данных образцов были повторно измерены текстурные свойства.

Для исследования влияния облучения на текстурные свойства НП CaF_2 , полученные методом ИЭП, были облучены наносекундным релятивистским электронным пучком на импульсно-периодическом ускорителе УРТ-1М [8]. НП CaF_2 перед облучением отжигались в алуновых тиглях при температуре 200,400,900 °С в течении 10 мин. Далее образцы НП до и после отжига обозначены как S_0, S_{200}, S_{400} и S_{900} , соответственно.

Облучение образцов проводилось при энергии электронов 700 кэВ, длительности импульса ~100 нс, частоте подачи импульсов 35 Гц. Время облучения составляло 10 минут, затем у половины образцов еще 15 минут. Поглощенные дозы (ПД) на поверхности образцов составляли 31,5 и 63 МГр. Расстояние от выпускного окна до облучаемых объектов составляло 5 см. Образцы НП помещались в пакеты из алюминиевой фольги (толщина фольги 30 мкм, толщина слоя НП не более 0,5 мм), которые фиксировались на массивной алюминиевой пластине, охлаждаемой вентиляторами. Измерение температуры алюминиевой пластины проводилось термопарой, температура при облучении не превышала 70 °С.

3. Результаты и обсуждения

Согласно данным ВЕТ-ВН-анализа (см. Таблицу 1), размер и объем пор изменяется нелинейно с увеличением концентрации допанта с наличием выраженного максимума. При небольшой концентрации допанта MnO_2 S_{BET} понизилась, при этом дальнейшее увеличение концентрации ведет к повышению S_{BET} . Была проведена оценка числа пор в общем объеме пор (N_{p-v}) и числа пор по площади поверхности (N_{p-s}). Для этого было найдено отношение удельного объема пор образцов и площади поверхности к объему и площади одной поры, соответственно, рассчитанным на основе размеров пор в приближении к сферической форме. Результаты расчетов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Текстурные свойства НП SiO_2 , $\text{SiO}_2 - \text{MnO}_2$

Образец	S_{BET} , м ² /г	$D_{\text{ВН}}$, нм	$V_{p-total}$, см ³ /г	N_{p-s} , 10 ¹⁷ шт.	N_{p-v} , 10 ¹⁶ шт.	R_{p-BET} , %
SiO_2	125,40	18,6	0,36	11,5	10,7	9,2
$\text{SiO}_2 - 0,1\% \text{MnO}_2$	75,78	20,6	0,36	5,69	7,9	13,8
$\text{SiO}_2 - 1\% \text{MnO}_2$	88,89	22,1	0,33	5,8	5,8	10,1
$\text{SiO}_2 - 3\% \text{MnO}_2$	134,18	26,4	0,88	6,13	9,1	14,9
$\text{SiO}_2 - 5\% \text{MnO}_2$	176,35	20,8	0,52	13,0	11,0	8,5

Видно, что при допировании малыми концентрациями MnO_2 число пор уменьшается, что, возможно, объясняет уменьшение площади поверхности. Результаты расчетов показывают, что доля площади пор $R_{p-BET} < 15\%$ от общей площади образцов S_{BET} , причем наибольшую пористость продемонстрировал образец с 3% концентрацией допанта, при которой достигается максимум по размеру и объему пор.

Текстурные изменения при допировании могут быть связаны с возникновением дефектов в структуре при взаимодействии атомов марганца и кислорода в кремнии с образованием электронейтральных химически связанных комплексов (молекул) в решётке кремния. Таким образом, управление S_{BET} возможно путем допирования на этапе приготовления мишеней за счет повышения дефектности структуры при повышении концентрации допанта в процессе получения НП методом ИЭП. Этот вывод для НП полученных методом ИЭП подтверждают результаты работы [9], в которой допирование позволяет контролировать текстурные свойства НП оксида гадолиния, допированного диоксидом кремния.

Из данных Таблицы 2 видно, что с ростом времени УЗ-обработки удельная поверхность и пористость образцов (как объем, так и размер пор) SiO_2 монотонно уменьшается. Пористость и площадь поверхности допированных образцов после УЗ-обработки (см. данные Таблицы 2) также уменьшилась относительно текстурных свойств НП, не подвергавшихся обработке (см. данные Таблицы 1), что указывает на возможность управления текстурными свойствами за счет воздействия УЗ.

Была рассчитана доля площади пор в общей площади поверхности (R_s) как отношение площади поверхности пор (произведение площади одной поры и числа пор) к площади удельной поверхности S_{BET} . Для образца чистого НП SiO_2 площадь пор уменьшается с увеличением времени озвучивания t_{sc} , в то время как доля пор в общей площади растет.

Механизмы УЗ-воздействия на структуру НП не достаточно изучены, но можно предположить, что в результате воздействия УЗ происходит разрушение агломератов с образованием более мелких и уплотненных структур. Причем полученные результаты УЗО на чистый SiO_2 и допированный MnO_2 НП различаются, что говорит о пониженной прочности агломератов допированных образцов. При этом из данных Таблицы 3 видно, что образцы, допированные 1% и 3% MnO_2 , быстрее теряют удельную поверхность при УЗО, что свидетельствует о пониженной стойкости агломератов допированного малыми концентрациями.

Текстурный анализ образцов CaF_2 (см. Таблицу 3) показал, что отжиг

при 900 °С привел к росту размера частиц и потере мезопористости образцом S900. Обнаружен значительный рост удельной поверхности не облученных НП CaF_2 после отжига при температуре 200 °С (см. Таблицу 3). Отметим, что подобный рост удельной поверхности ранее наблюдался при отжиге НП BaF_2 .

Таблица 2. Текстуальные свойства НП SiO_2 , $SiO_2 - MnO_2$

Образец	$D_{ВН}$, нм	S_{BET} , м ² /г	$V_{p-total}$, см ³ /г	t_{sc} , мин.	R_{p-BET} , %	R_s , отн.ед.
SiO_2	18,6	125,40	0,36	0	9,3	1
$H_2O - SiO_2$	16,5	88,20	0,28	40	11,5	0,7
$H_2O - SiO_2$	16,0	55,52	0,20	100	13,5	0,4
$SiO_2 - 0,1 MnO_2$	20,6	75,78	0,36	0	13,8	1,0
$H_2O - SiO_2 - 0,1\% MnO_2$	—	68,6	—	60	—	0,9
$SiO_2 - 1\% MnO_2$	22,1	88,89	0,33	0	10,1	1,0
$H_2O - SiO_2 - 1\% MnO_2$	17,1	135,78	0,51	0	5,2	1,5
$H_2O - SiO_2 - 1\% MnO_2$	16,5	120,11	0,39	20	6,06	1,4
$H_2O - SiO_2 - 1\% MnO_2$	21,8	40,69	0,12	40	13,5	0,5
$SiO_2 - 3\% MnO_2$	26,4	134,18	0,88	0	14,9	1,0
$H_2O - SiO_2 - 3\% MnO_2$	13,7	53,37	0,20	40	16,41	0,4
$SiO_2 - 5\% MnO_2$	20,8	176,35	0,52	0	8,5	1,0
$H_2O - SiO_2 - 5\% MnO_2$	16,2	63,09	0,18	0	13,9	0,4
$H_2O - SiO_2 - 5\% MnO_2$	18,7	151,9	0,33	60	4,22	0,86

Таблица 3. Текстуальные свойства образцов НП CaF_2

Образец	S_{BET} , м ² /г			$V_{p-total}$, см ³ /г			$D_{ВН}$, нм		
	ПД, МГр			ПД, МГр			ПД, МГр		
	0	31,5	63	0	31,5	63	0	31,5	63
S0	64,3	79,8	91,49	0,25	0,519	0,46	21	27,9	25,2
S200	88,7	77,1	45,92	0,66	0,51	0,35	29	27,2	28,5
S400	52,4	70,02	79,25	0,30	0,51	0,46	22,5	26,3	26,3
S900	1,11	—	2,22	0,0025	—	0,0039	37	—	35,2

Облучение НП приводит к существенному росту удельной поверхности НП, при этом для образца S400 увеличение более чем в 1,5 раза. Все образцы НП, в том числе отожженные при различных температурах ведут себя единообразно, кроме образца S200 облученного ПД 63 МГр. Эта аномалия требует дополнительного изучения. Удивление вызывает двукратный рост удельной поверхности и в 1,5 раза общего

объема пор для образца S900. Облучение НП неожиданно воздействует на общий объем и средний диаметр пор – эти величины не только увеличиваются, но и выравниваются, особенно при ПД 31,5 МГр, даже для образца S200 (см. Таблицу 3).

Таким образом, установлено, что отжиг при небольших температурах (без потери мезопористости) НП и облучение релятивистскими электронами являются способами управления текстурными свойствами НП, причем отличие воздействия способов состоит в нормализации текстурных свойств НП после облучения.

4. Заключение

Таким образом, в процессе работы были изучены различные способы управления текстурными свойствами НП, как на этапе их получения, так путем различных воздействий физическими способами на готовые НП.

Было показано, что допирование на этапе приготовления мишеней для испарения в процессе получения НП позволяет управлять площадью удельной поверхности. При увеличении концентрации допанта, удельная площадь поверхности НП $\text{SiO}_2\text{--MnO}_2$ возрастала. При допировании малыми концентрациями MnO_2 число пор уменьшается, что, возможно, объясняет уменьшение площади поверхности. Доля площади пор не превышает 15% от общей площади образцов, причем наибольшую пористость продемонстрировал образец с 3% концентрацией допанта, при которой достигается максимум по размеру и объему пор.

Были предложены способы управления пористостью готовых НП. Обработка водных суспензий НП ультразвуком с последующим отделением и высушиванием приводит к снижению пористости и площади удельной поверхности. С ростом времени УЗ-обработки удельная поверхность и пористость образцов (как объем, так и размер пор) монотонно уменьшается. Результаты УЗ-обработки чистого SiO_2 и допированного MnO_2 НП различаются, что говорит о пониженной прочности агломератов допированных образцов.

Наоборот, облучение НП релятивистскими электронами приводит к увеличению площади удельной поверхности, общего объема и среднего диаметра пор. Более того, облучение НП приводит к нормализации текстурных свойств НП после облучения.

Авторы выражают благодарность м.н.с. Т.М. Деминой ФГБУН «Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук» за измерение текстурных свойств НП и проведение ВЕТ-ВЛН анализа, н.с. М.Е. Бализину за облучение образцов CaF_2 . Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0389-2015-0026 и при поддержке РФФИ (проект № 18-08-00514).

Библиографический список:

1. **Li, Y.** Hollow mesoporous silica nanoparticles with tunable structures for controlled drug delivery / Y. Li, N. Li, W. Pan, et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – V. 9. – I. 3. – P. 2123 – 2129.
2. **Shen, S.** High drug-loading nanomedicines: progress, current status, and prospects / S. Shen, Y. Wu, Y. Liu, D. Wu // *International journal of nanomedicine*. – 2017. – V. 12. – P. 4085-4109.
3. **Chen, F.** Engineering of hollow mesoporous silica nanoparticles for remarkably enhanced tumor active targeting efficacy / F. Chen, H. Hong, S. Shi, et al. // *Nature: Scientific reports*. – 2014. – V. 4. – Art. № 5080. – 10 p.
4. **Irvani, S.** Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods / S. Irvani, H. Korbekandi, S.V. Mirmohammadi, B. Zolfaghari // *Research in Pharmaceutical Sciences*. – 2014. – V. 9. – № 6. – P. 385-406.
5. **Sokovnin, S.Yu.** Production of complex metal oxide nanopowders using pulsed electron beam in low-pressure gas for biomaterials application / S. Yu. Sokovnin, V.G. Il'ves, M.G. Zuev // *Engineering of Nanobiomaterials Applications of Nanobiomaterials*. – 2016. – V. 2. – P. 29-75.
6. **Sokovnin, S.Yu.** Production of nanopowders using pulsed electron beam / S.Yu. Sokovnin, V.G. Il'ves // *Ferroelectrics*. – 2012. – V. 436. – I. 1. – P. 101-107.
7. **Zlygosteva, O.A.** The use of manganese-doped mesoporous silica nanopowder for targeted drug delivery / O.A. Zlygosteva, S.Yu. Sokovnin, V.G. Ilves // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1115. – Art. № 042067. – 7 p.
8. **Sokovnin, S.Yu.** Repetitive nanosecond electron accelerators type URT-1 for radiation technology / S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2018. – V. 144. – P. 265-270.
9. **Ilves, V.G.** On the interrelations of porosity and structural defects in amorphous-crystalline nanopowders SiO_2 – doped Cd_2O_3 with their magnetic and luminescent properties / V.G. Ilves, A.M. Murzakaev, S.Y. Sokovnin // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2018. – V. 271. – P. 203-218.

References:

1. **Li, Y.** Hollow mesoporous silica nanoparticles with tunable structures for controlled drug delivery / Y. Li, N. Li, W. Pan, et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – V. 9. – I. 3. – P. 2123 – 2129.
2. **Shen, S.** High drug-loading nanomedicines: progress, current status, and prospects / S. Shen, Y. Wu, Y. Liu, D. Wu // *International journal of nanomedicine*. – 2017. – V. 12. – P. 4085-4109.
3. **Chen, F.** Engineering of hollow mesoporous silica nanoparticles for remarkably enhanced tumor active targeting efficacy / F. Chen, H. Hong, S. Shi, et al. // *Nature: Scientific reports*. – 2014. – V. 4. – Art. № 5080. – 10 p.
4. **Irvani, S.** Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods / S. Irvani, H. Korbekandi, S.V. Mirmohammadi, B. Zolfaghari // *Research in Pharmaceutical Sciences*. – 2014. – V. 9. – № 6. – P. 385-406.
5. **Sokovnin, S.Yu.** Production of complex metal oxide nanopowders using pulsed electron beam in low-pressure gas for biomaterials application / S. Yu. Sokovnin, V.G. Il'ves, M.G. Zuev // *Engineering of Nanobiomaterials Applications of Nanobiomaterials*. – 2016.

– V. 2. – P. 29-75.

6. **Sokovnin, S.Yu.** Production of nanopowders using pulsed electron beam / S.Yu. Sokovnin, V.G. Ilves // *Ferroelectrics*. – 2012. – V. 436. – I. 1. – P. 101-107.

7. **Zlygosteva, O.A.** The use of manganese-doped mesoporous silica nanopowder for targeted drug delivery / O.A. Zlygosteva, S.Yu. Sokovnin, V.G. Ilves // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1115. – Art. № 042067. – 7 p.

8. **Sokovnin, S.Yu.** Repetitive nanosecond electron accelerators type URT-1 for radiation technology / S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2018. – V. 144. – P. 265-270.

9. **Ilves, V.G.** On the interrelations of porosity and structural defects in amorphous-crystalline nanopowders SiO_2 – doped Cd_2O_3 with their magnetic and luminescent properties / V.G. Ilves, A.M. Murzakaev, S.Y. Sokovnin // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2018. – V. 271. – P. 203-218.

Short communication

MANAGING THE TEXTURAL PROPERTIES OF SiO_2 , SiO_2 - MnO_2 , CaF_2 NANOPOWDERS

O.A. Zlygosteva^{1,2}, S.Yu. Sokovnin^{1,2}, V.G. Ilves²

¹*Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia*

²*Institute of Electrophysics of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.582

Abstract: Physical and chemical properties of nanomaterials depend not only on the nature of the substance, but also on the size and shape of particles and pores. This paper investigates methods for managing the textural properties of nanopowders, obtained by pulsed evaporation by an electron beam in vacuum. The methods include doping at the stage of the nanopowder production, ultrasonic processing of aqueous suspensions of nanopowders and irradiating nanopowders with relativistic electrons.

Keywords: *managing properties, porosity, nanopowder, silicon dioxide, fluorides.*

Злыгостева Ольга Александровна – аспирант кафедры экспериментальной физики физико-технологического ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Соковнин Сергей Юрьевич – д.т.н., профессор ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ведущий научный сотрудник, руководитель группы электрофизических технологий ФГБУН «Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук»

Ильвес Владислав Генрихович – к.т.н., старший научный сотрудник группы электрофизических технологий ФГБУН «Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук»

Olga A. Zlygosteva – postgraduate student of the Department of Experimental Physics of Physics and Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Sergey Yu. Sokovnin – Dr. Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Leading Researcher, Head of the Group of Electrophysical Technologies, Institute of Electrophysics of the Ural Branch of RAS

Vladislav G. Ilves – Ph. D., Senior Researcher, Group of Electrophysical Technologies, Institute of Electrophysics of the Ural Branch of RAS

Поступила в редакцию/received: 15.09.2019; после рецензирования/revised: 28.10.2019; принята/accepted 10.11.2019.