

Особенности формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза

К. Халугарова , Ю. М. Спивак, В. А. Мошников

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

 kamilya_kh@mail.ru

Аннотация

Введение. Пористые наночастицы оксидов металлов имеют большое научно-технологическое значение и широкий спектр применения. Для получения таких материалов применяются методы соосаждения, золь-гель, а также микроэмульсионные, гидротермальные, парофазные и другие методы. В настоящее время для синтеза пористых наночастиц оксидов металлов разрабатываются методы зеленого синтеза с применением экстрактов растений.

Цель работы. Разработка масштабируемой методики получения пористых наночастиц оксида никеля с высокой удельной площадью поверхности. Исследование особенностей формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза.

Материалы и методы. Методом зеленого синтеза с применением экстракта дымянки лекарственной получены наночастицы оксида никеля. Химический состав и микроструктура поверхности исследованы с помощью рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Для исследования параметров полученной пористой структуры, таких, как удельная площадь поверхности, объем и размер пор, использовали метод тепловой десорбции и метод Брунауэра–Эммета–Теллера.

Результаты. Методом зеленого синтеза с применением экстракта растения получены крупные пористые агломераты размерами от нескольких до десятков микрометров. Показано, что изменением частоты центрифугирования можно варьировать удельную площадь поверхности структур (до значений $S_{уд} = 130 \text{ м}^2/\text{г}$). Также показано, что удельной площадью поверхности частиц можно управлять температурой отжига. При выборе оптимальной температуры возможно полное (почти полное) удаление органических лигандов, стабилизирующих наночастицы. Предложена модель получения развитой пористой структуры при зеленом синтезе.

Заключение. Методом зеленого синтеза с применением экстракта дымянки лекарственной были получены иерархические пористые наночастицы оксида никеля, разработана методика получения этих наночастиц с высокой удельной площадью поверхности. Показано, что такие технологические параметры, как частота центрифугирования и температура отжига, существенно влияют на строение и удельную площадь поверхности пористых наночастиц оксида никеля. Системы из пористых наночастиц перспективны для применения в качестве катализаторов, адсорбентов, электродов и магнитных и фотоэлектрических материалов. Также такие агрегированные наночастицы перспективны для применения в инкорпорированных и инкапсулированных нанокомпозитах и для создания специализированных ростовых платформ.

Ключевые слова: зеленый синтез, оксид никеля, иерархические пористые наночастицы, оксид металла

Для цитирования: Халугарова К., Спивак Ю. М., Мошников В. А. Особенности формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 55–67. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-55-67

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022. <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>.

Благодарности. Авторы благодарят Бобова Вячеслава Юрьевича (ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"») за помощь в измерениях методом сканирующей электронной микроскопии и Матвеева Василия Александровича (ПИЯФ им. Б. П. Константинова, НИЦ "Курчатовский институт") за помощь в измерениях методом рентгенофазового анализа.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; принята к публикации после рецензирования 10.10.2024; опубликована онлайн 27.12.2024



Formation of Hierarchical Porous Nickel Oxide Nanoparticles by Green Synthesis

Kamilya Khalugarova✉, Yulia M. Spivak, Vyacheslav A. Moshnikov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ kamilya_kh@mail.ru

Abstract

Introduction. Porous metal oxide nanoparticles are of great scientific and technological importance due to their wide range of applications. Such materials are obtained by co-deposition, sol-gel, microemulsion, hydrothermal, vapor-phase, etc., methods. Currently, porous metal oxide nanoparticles can be obtained by green synthesis from plant extracts.

Aim. Development of a scalable technique for obtaining porous nickel oxide nanoparticles with a high specific surface area. Investigation of the process of forming hierarchical porous nickel oxide nanoparticles by green synthesis.

Materials and methods. Nickel oxide nanoparticles were obtained by green synthesis using an extract of *Fumaria officinalis*, a medicinal plant. The chemical composition and surface microstructure were studied by X-ray phase analysis, scanning and transmission electron microscopy. The parameters of the resulting porous structure, such as specific surface area, volume, and pore size, were investigated by the methods of thermal desorption and BET.

Results. Large porous agglomerates ranging in size from several to tens of micrometers were obtained. It was shown that centrifugation rate can be used to vary the specific surface area of structures (up to values of $S_{sa} = 130 \text{ m}^2/\text{g}$). Annealing temperature can also be used to manage the specific surface area of particles. When an optimal temperature is selected, an almost complete removal of organic ligands that stabilize nanoparticles can be achieved. A model for obtaining a developed porous structure by green synthesis is proposed.

Conclusion. Hierarchical porous nickel oxide nanoparticles were obtained by the method of green synthesis using a *Fumaria officinalis* extract. A technique for obtaining porous nickel oxide nanoparticles with a high specific surface area was developed. It is shown that technological parameters, such as centrifugation rate and annealing temperature, affect significantly the structure and specific surface area of porous nickel oxide nanoparticles. Systems made of porous nanoparticles are promising for use as catalysts, adsorbents, and electrodes, as well as magnetic and photovoltaic materials. Such aggregated nanoparticles are also promising for use in incorporated and encapsulated nanocomposites, and for creating specialized growth platforms.

Keywords: green synthesis, nickel oxide, hierarchical porous nanoparticles, metal oxide

For citation: Khalugarova K., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A. Formation of Hierarchical Porous Nickel Oxide Nanoparticles by Green Synthesis. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 55–67. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-55-67

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

Source of funding. The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-42-10029 dated 12/20/2022. <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>.

Acknowledgments. The authors thank Vyacheslav Yu. Bobov (State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC) for his help in measurements by scanning electron microscopy and Vasily A. Matveev (Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of NRC "Kurchatov Institute") for his help in measurements by XRD analysis.

Submitted 02.09.2024; accepted 10.10.2024; published online 27.12.2024

Введение. Постоянно растущие современные технологические требования к миниатюризации устройств, увеличению каталитической эффективности, легкости и энергоэффективности привели к разработке и изучению наноматериалов, сочетающих свойства классических наноматериалов с низкой объемной плотностью и высокой площадью поверхности пористых наноматериалов. Наличие пористой текстуры с каналами и/или пустотами различных форм и размеров позволяет увеличивать удельную площадь поверхности, улучшать адсорбционные свойства, а также обеспечивает проницаемость/транспортировку жидкостей и/или газов. Кроме того, пористость способствует улучшению каталитической активности материала, в том числе и за счет роста площади взаимодействия, увеличения количества обрванных связей в поверхностных атомах и изменения количества соседей по сравнению с объемом. При этом возможен пиннинг уровня Ферми, а также изменение поверхностной энергии за счет кривизны поверхности [1–3].

Такие пористые наноматериалы, как, например, нанопористый¹ кремний, нанометаллические органические каркасы, нанопористые полимерные мембраны, нанопористые металлы и их оксиды, демонстрируют высокую гибкость конструкции. Это позволяет контролировать и варьировать их свойства посредством модификации поверхности или изменения структуры пор [4–8].

Пористые наночастицы оксидов металлов представляют собой новый класс наноматериалов, имеющий большое научное и технологическое значение и широкий спектр применения. К примеру, увеличенная площадь поверхности позволяет повысить дисперсность катализатора за счет более эффективного использования обычно дорогостоящих каталитических материалов. Кроме того, резкое искривление поверхно-

сти наночастиц приводит к повышению поверхностной энергии, что может способствовать росту реакционной способности или каталитической активности носителя и, следовательно, катализатора [9]. Традиционные методы получения пористых наночастиц оксидов металлов подразделяют на 3 типа:

- твердофазные (измельчение, обработка ультразвуком);
- жидкофазные (расплавленная соль, совместное осаждение, золь-гель, микроэмульсия, сольватермальные/гидротермальные, неводные);
- парофазные методы (пиролиз распылением, конденсация инертного газа) [10, 11].

Новый активно исследуемый способ получения пористых наночастиц оксидов металлов – метод зеленого синтеза [12, 13]. Он основан на реакции химического восстановления между вторичными метаболитами и солью металла. В табл. 1 приведено сравнение значений удельной площади поверхности пористых наночастиц оксида никеля, получаемых различными методами синтеза.

Из современных литературных источников известно, что таким методом можно получать наночастицы, но с менее развитой площадью поверхности по сравнению с классическими методами синтеза. В связи с этим актуальна задача развития методик зеленого синтеза пористых наночастиц металлов с увеличенной удельной площадью поверхности.

С этой точки зрения перспективна разработка технологических приемов и способов синтеза пористых наночастиц "снизу вверх" с иерархической структурой. Новые возможности таких наноматериалов обусловлены как наличием нескольких уровней иерархии структуры со своими характерными размерами, свойствами и функциональным назначением, так и характером взаимосвязей этих уровней, их фрактальностью, возможными синергетическими эффектами [14–23].

Таким образом, цель работы, описываемой в данной статье, – создание масштабируемой методики получения пористых наночастиц оксида никеля с высокой удельной площадью поверхности, а также изучение влияния технологических условий на строение иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза.

¹ В данном случае авторы используют термин "нанопористые", так как прежде всего хотят подчеркнуть наноразмерные особенности текстуры пористых материалов, включая наноразмерные сечения скелетной части пористой текстуры. Общепринято при классификации пористых материалов опираться на рекомендации международного общества IUPAC, в которых все пористые материалы делятся на микро-, мезо- и макропористые материалы.

Табл. 1. Значения удельной площади поверхности наночастиц оксида никеля, получаемые различными методами синтеза

Tab. 1. Specific surface area of nickel oxide nanoparticles obtained by various synthesis methods

Методы	$S_{уд}$, м ² /г	Источник
Классические методы:		
Гидротермальный синтез	84.7	[24]
Гидролиз	477.7	[25]
Термическое разложение	88.5	[26]
Гидротермальный синтез	40.3	[27]
Гидротермальный синтез	198.0	[28]
Золь-гель-синтез	112.0	[29]
Электроспиннинг	25.8	[30]
Метод зеленого синтеза:		
Экстракт листьев <i>Croton macrostachyus</i> (широколиственное кротоновое дерево)	22.4	[31]
Экстракт геля <i>Aloe vera</i> (алоэ)	40.9...58.4	[32]
Экстракт <i>Spirogyra</i> sp. (спирогира)	16.7	[33]
Экстракт растения <i>Capparis Spinosa</i> (каперсы колючие)	3.7	[34]

Материалы и методы. Наночастицы оксида никеля получали методом зеленого синтеза. Для восстановления соли никеля и стабилизации синтезируемых наночастиц применялся экстракт дымянки лекарственной (*fumaria officinalis*) [35, 36]. Смешивались 30 мл $NiSO_4$ (15 ммоль) с 10 мл экстракта растения с добавлением 2 %-го раствора NaOH для повышения уровня pH для активации реакции. Далее раствор помещался в ультразвуковую ванну на 30 мин. После обработки полученный осадок промывался дистиллированной водой для очищения от остатков реакции, центрифугировался при частоте от 3500 до 13 500 мин⁻¹ и сушился при 50 °С. Далее полученные частицы подвергались высокотемпературному отжигу в течение 30 мин при 300...500 °С.

Состав исследовался методом рентгеновского фазового анализа на дифрактометре Rigaku SmartLab 3 кВт с использованием рентгеновской трубки с медным анодом (CuK α).

Морфологию полученных частиц исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (электронным микроскопом TESCAN MIRA3) и просвечивающей электронной микроскопии.

Для исследования параметров полученной пористой структуры, таких, как удельная площадь поверхности $S_{уд}$, объем и размер пор, использовались метод тепловой десорбции и метод Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) на приборе Сорби (ЗАО МЕТА) [37, 38].

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены результаты рентгенофазового анализа. На рентгеновской дифрактограмме индици-

рованы рефлексы, соответствующие межплоскостным расстояниям 0.2414; 0.2089; 0.1477; 0.129; 0.1206 нм фазы оксида никеля NiO (II) [40].

Результаты исследования поверхности наночастиц NiO, полученных методом зеленого синтеза и подвергнутых высокотемпературной обработке, по данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) приведены на рис. 2. Как видно, полученные частицы имеют развитую пористую структуру, состоящую из разного размера частиц, пор и каналов. При этом размеры самих частиц примерно 30...50 нм.

Результаты просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для данного типа частиц представлены на рис. 3.

По результатам ПЭМ можно предположить, что наночастицы размером 1...5 нм представляют собой наименьший наблюдаемый структурный уровень иерархии. Такие частицы

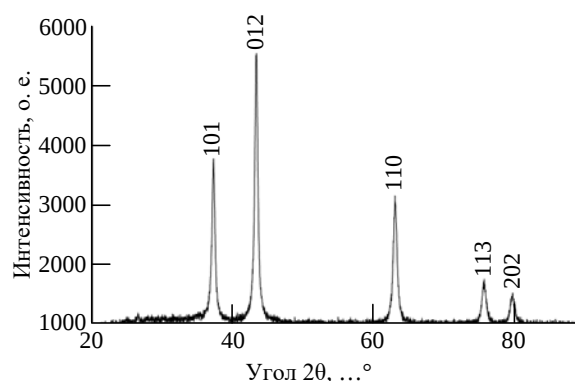


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма частиц оксида никеля, полученных методом зеленого синтеза

Fig. 1. X-ray diffractogram of nickel oxide particles obtained by green synthesis

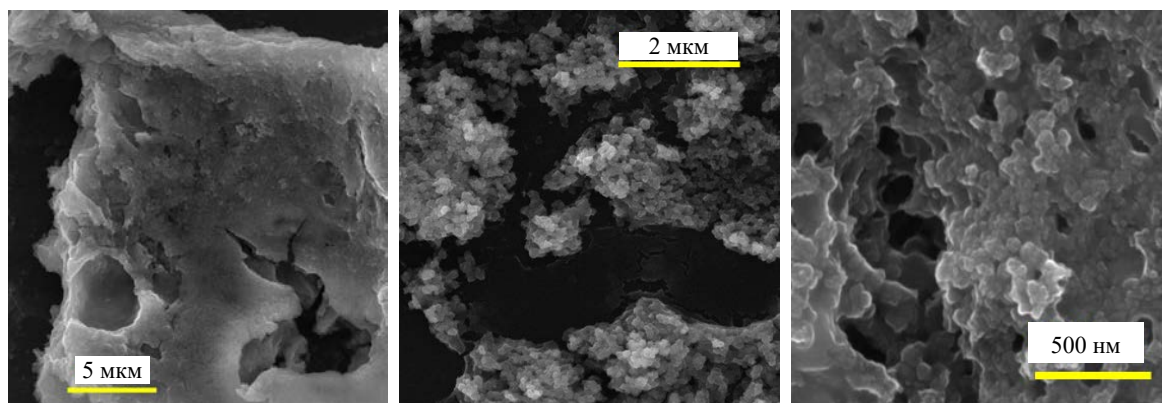


Рис. 2. СЭМ-изображения частиц оксида никеля, полученных методом зеленого синтеза

Fig. 2. SEM images of nickel oxide nanoparticles obtaining by green synthesis

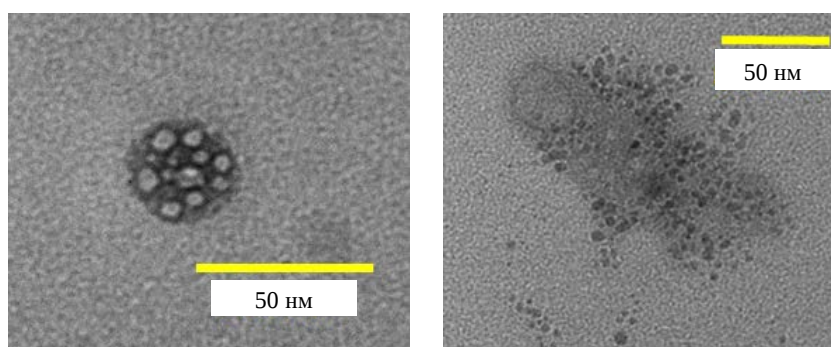


Рис. 3. ПЭМ-изображения частиц оксида никеля, полученных методом зеленого синтеза

Fig. 3. TEM images of nickel oxide nanoparticles obtaining by green synthesis

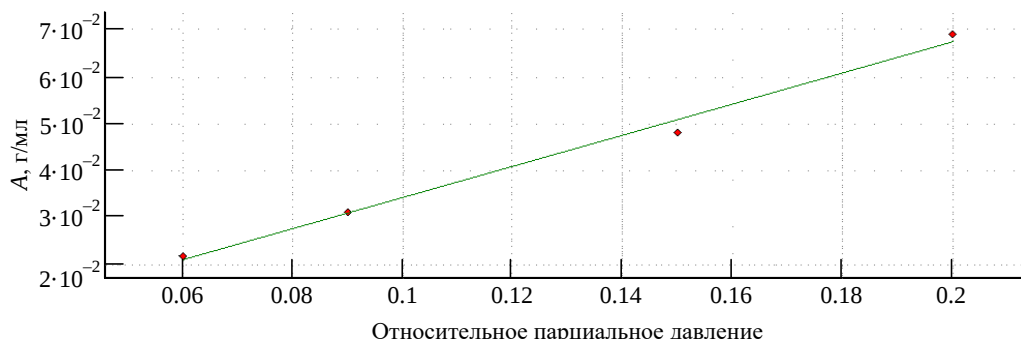


Рис. 4. График БЭТ для наночастиц оксида никеля, полученного методом зеленого синтеза

Fig. 4. BET graph for nickel oxide nanoparticles obtained by green synthesis

образуют пористые структурные элементы второго уровня 30...50 нм, из которых далее складывается следующий уровень иерархии пористых наночастиц оксида никеля, что коррелирует с данными СЭМ (рис. 2).

Наночастицы, отожженные при температуре 500 °С, были исследованы методом БЭТ для определения удельной площади поверхности. На рис. 4 представлен график уравнения БЭТ, где по оси ординат отложена величина $A = \frac{p/p_0}{(1 - p/p_0)a}$,

соответствующая левой части уравнения БЭТ. По результатам исследования методом БЭТ удельная площадь поверхности составила $130.7 \pm 6.7 \text{ м}^2/\text{г}$. Сравнив это значение с данными табл. 1, можно отметить, что удалось пре- высить приведенные значения в несколько раз.

Далее для определения объема и распре- деления пор по размерам образцы исследовались методом тепловой десорбции. На графике пол- ной изотермы адсорбции (рис. 5) присутствует гистерезис, что свидетельствует о наличии в образце капиллярной конденсации.

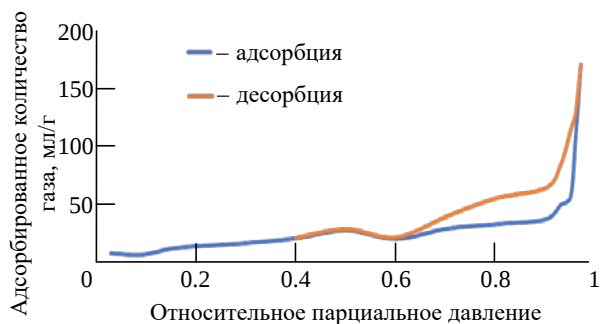


Рис. 5. Полная изотерма адсорбции исследуемого образца

Fig. 5. Total adsorption isotherm of a test sample

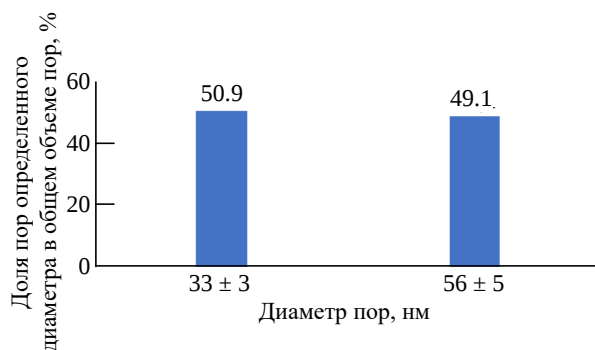


Рис. 6. Распределение пор по размерам по итогам исследования структуры методом тепловой десорбции

Fig. 6. Pore size distribution based on a study of the structure by thermal desorption

На рис. 6 приведена диаграмма распределения пор по размерам исследуемого образца. Видно, что для иерархии (дизайна) наночастиц характерны две группы размеров пор – диаметрами 33 ± 3 и 56 ± 5 нм. Доля первых составляет 50.9 % от общего объема пор, а доля пор диаметром 56 нм – 49.1 %. Более крупные макропоры следующего иерархического уровня (размерами свыше 50 нм), наблюдаемые по данным СЭМ (см. рис. 2), методом капиллярной конденсации не обнаруживаются, так как в макропорах процессы адсорбции-десорбции протекают по иному механизму, чем в микро- и мезопорах.

При изучении влияния технологических условий на строение иерархических пористых наночастиц оксида никеля значимыми факто-

рами эксперимента выявлены значения частоты центрифугирования на этапе очищения образцов от исходного раствора дистиллированной водой и температуры на этапе отжига.

Для исследования влияния частоты центрифугирования осадка на этапе промывания дистиллированной водой проводился ряд экспериментов при частотах центрифугирования 3500, 5500, 7500, 10 500, 13 500 мин^{-1} . Промывание на каждой частоте длилось 10 мин и повторялось несколько раз. После отжига при температуре 500 °С образцы исследовались методом БЭТ на сорбтометре Сорби-М.

Результирующие значения удельной площади поверхности приведены в табл. 2.

На рис. 7 представлена зависимость удельной площади поверхности от частоты центрифугирования. Как видно из графика, удельная площадь поверхности возрастает до частоты центрифугирования 7500 мин^{-1} , а при дальнейшем повышении частоты снижается и достигает определенного значения.

Для объяснения немонотонного поведения зависимости удельной площади поверхности от частоты центрифугирования, а также узкого

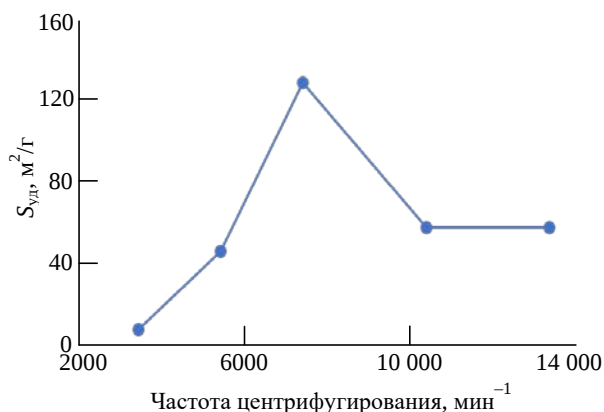


Рис. 7. Зависимость удельной площади поверхности от частоты центрифугирования

Fig. 7. Dependence of specific surface area on centrifugation rate

Табл. 2. Результаты полученных значение удельной площади поверхности в зависимости от частоты центрифугирования

Tab. 2. Values of specific surface area obtained under different centrifugation rate

Частота центрифугирования, мин^{-1}	Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$
3500	8.6 ± 0.2
5500	47.2 ± 2.7
7500	130.7 ± 6.7
10 500	59 ± 1.2
13 500	58.8 ± 1.2

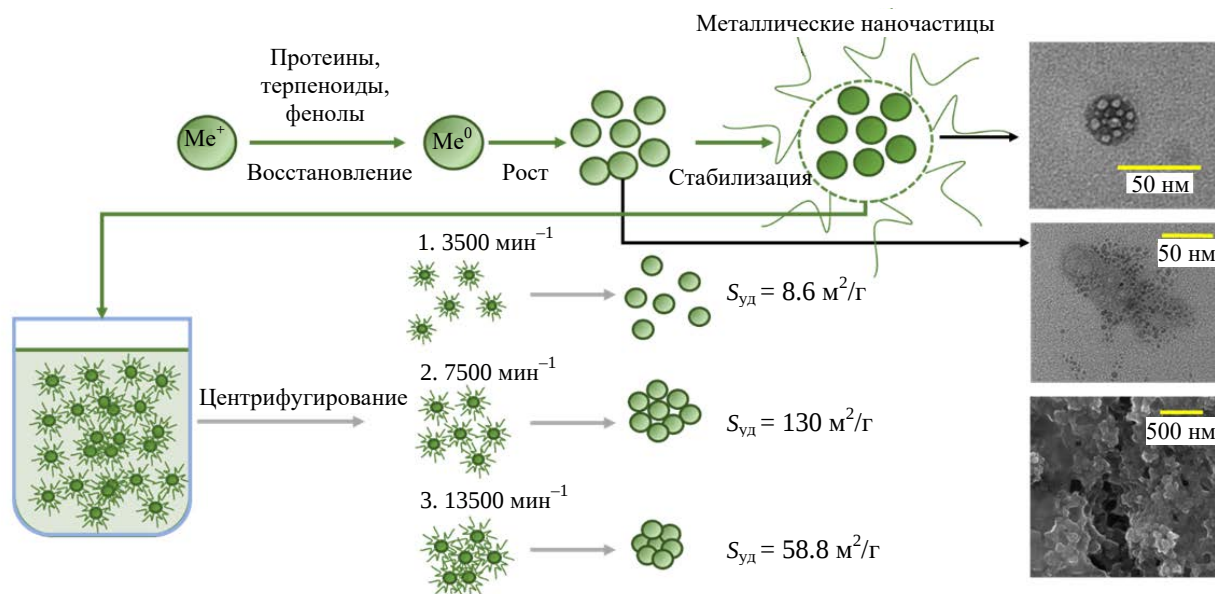


Рис. 8. Схема предполагаемой модели формирования частиц пористого оксида никеля с учетом влияния частоты центрифугирования

Fig. 8. Proposed model for the formation of porous nickel oxide particles, taking the influence of centrifugation rate into account

распределения мезопор по размерам была предложена модель формирования частиц пористого оксида никеля (рис. 8).

Предполагается, что на значение удельной площади поверхности частиц влияет наличие органических лигандов, являющихся стабилизаторами наночастиц на начальном этапе синтеза. Функциональные группы (такие, как $-C-O-C-$, $-C-O-$, $-C=C-$), присутствующие во вторичных метаболитах растений, а также флавоноиды, алкалоиды, фенолы и др. служат стабилизаторами для предотвращения дальнейшего разрастания и агрегации получаемых наночастиц. Таким образом, наночастицы – структурные элементы первичного и вторичного уровней, стабилизированные такими функциональными группами, имеют закрепленные лиганды вокруг своего объема. При относительно небольших частотах центрифугирования (до 5000 мин^{-1}) структура агрегата, формирующегося из таких структурных элементов, уплотняется недостаточно сильно, чтобы организовать пористую матрицу, а отжигом при 500°C лиганды удаляются с поверхности частиц, оставляя таким образом диспергированные неуплотненные частицы. При средних частотах (до $10\,000 \text{ мин}^{-1}$) структура таких агрегатов уплотняется сильнее, и с дальнейшим

отжигом и удалением лигандов в ней образуются пустоты и наблюдается частичное спекание частиц. Это приводит к образованию укрупненных частиц с пористой структурой и с большой площадью поверхности. При очень высоких частотах ($10\,000 \text{ мин}^{-1}$ и выше) лиганды проникают глубже в пространство между частицами и уменьшают расстояние между ними, тем самым значительно уплотняя структуру и уменьшая удельную площадь поверхности.

Исходя из изображений, полученных методом ПЭМ, и результатов распределения пор по размерам по данным исследования методом полной изотермы адсорбции (капиллярной конденсации) (рис. 8, вставка справа), как уже отмечалось, было выделено 2 низших структурных элементарных уровня, из которых формируются более крупные пористые частицы, и 2 вида мезопор, различающиеся в 2 раза по размерам. При этом предполагается, что структура оксида никеля формируется за счет последовательного соединения квазисферических частиц. Наиболее близкой к формируемому типу частиц является модель фрактального агрегата Жюльена (рис. 9) [41].

В трехмерном случае идеализированная модель фрактала Жюльена, представляющая собой сборку из равных по размерам началь-

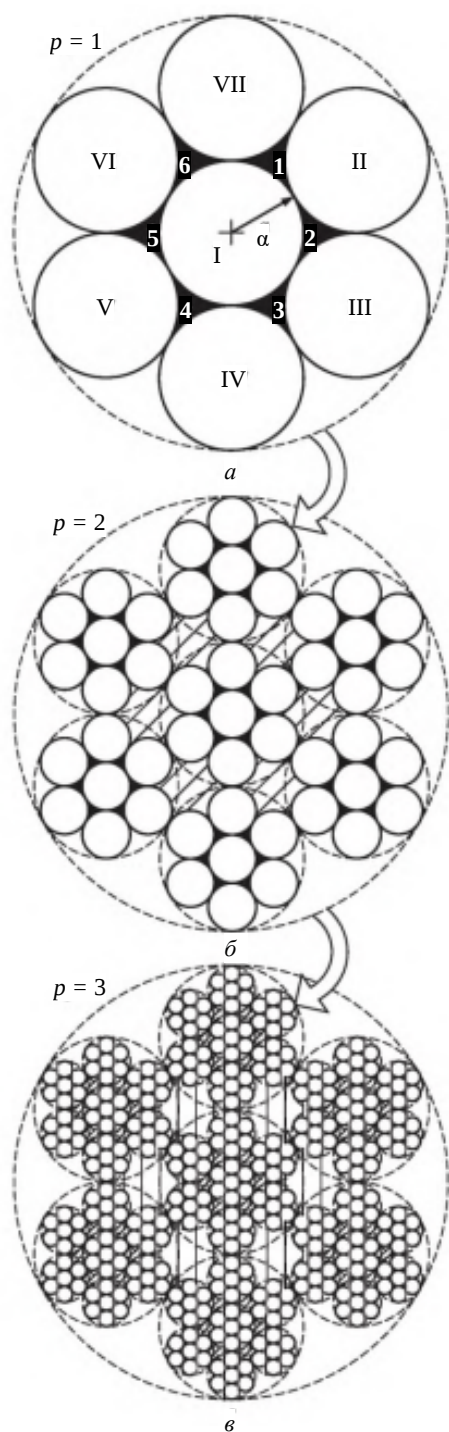


Рис. 9. Квазидвумерная проекция трехмерного детерминированного фрактального агрегата Жюльена: а – первая итерация; б – вторая итерация; в – третья итерация [41]

Fig. 9. Quasi-two-dimensional projection of a three-dimensional deterministic fractal Julien aggregate: а – first iteration; б – second iteration; в – third iteration

ных частиц, дополняется тремя частицами в верхнем слое и тремя частицами в нижнем. Таким образом, фрактальная размерность Хаус-

дорфа–Безиковича в двумерном варианте $D = \ln 7 / \ln 3$, а в трехмерном $D = \ln 13 / \ln 3$ [42].

Сборка полученных наночастиц в условиях, когда размеры пор могут определяться по гистерезису капиллярной конденсации, качественно подтверждает модель формирования пористой структуры по кластер-кластерной агрегации. Размеры частиц первого уровня оксида никеля составляют примерно 2...5 нм. Размер иерархических наночастиц $\approx 30...50$ нм. Разброс размеров наночастиц свидетельствует о более сложных механизмах, чем в идеализированной схеме строения фрактала Жюльена. Это связано не только с кластер-кластерной агрегацией, но и с возможностью продолжения процессов сборки "частица-кластер", с проникновением и диффузией в поры, с характером ориентированного сращивания (oriented attachment) [43] из-за влияния частоты центрифугирования и температуры отжига на лигандную оболочку.

Для исследования влияния температуры итогового отжига на удельную площадь поверхности была получена серия порошков, прошедших температурную обработку при 300, 400 и 500 °С. Результирующие значения удельных площадей поверхности приведены в табл. 3.

Табл. 3. Значения удельной площади поверхности при разной температуре отжига

Tab. 3. Value of specific surface area obtained under different annealing temperatures

Температура отжига, °С	Удельная площадь поверхности, м ² /г
300	9.0 ± 0.3
400	47.2 ± 2.7
500	130.7 ± 6.7

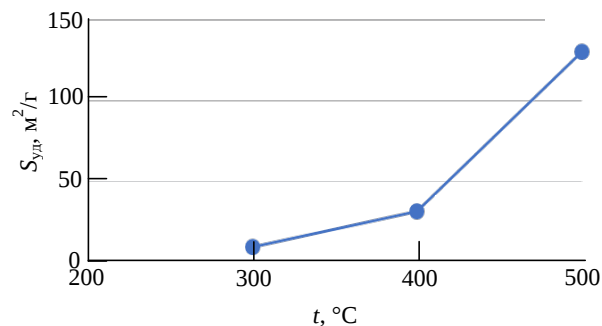


Рис. 10. Зависимость удельной площади поверхности от температуры отжига

Fig. 10. Dependence of specific surface area on annealing temperature

Зависимость удельной площади поверхности от температуры отжига представлена на рис. 10.

Исходя из полученных данных, можно предположить, что, как и в случае обработки методом центрифугирования, на удельную площадь поверхности влияет степень удаления лигандов из структуры наночастиц. При этом стоит отметить, что термообработки при температуре 300 °С в течение часа недостаточно и лиганды удаляются либо в малом количестве, либо не удаляются вовсе. Повышение температуры до 400 °С при термообработке в течение 1 ч приводит к получению значения удельной площади поверхности, в 3 раза превышающего значение при 300 °С. Это свидетельствует о частичном удалении лигандов с поверхности частиц. При повышении температуры до 500 °С достаточно термообработки в течение 30 мин для полного (почти полного) удаления стабилизирующих лигандов с поверхности частиц, что приводит к образованию после них свободных полостей (пор) в большом количестве и повышению удельной площади поверхности.

Заключение. В статье описано получение иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза. Была разработана методика получения пористых наночастиц с высокой удельной площадью поверхно-

сти (до 130 м²/г). Показано, что такие технологические параметры, как частота центрифугирования и температура отжига, существенно влияют на строение и удельную площадь поверхности пористых наночастиц оксида никеля. Исследование строения пористых наночастиц оксида никеля методами СЭМ и ПЭМ позволило выявить иерархическую структуру частиц с размерами структурных элементов первого (2...5 нм) и более высоких уровней (30...50 нм) и диаметром пор 33 ± 3 и 56 ± 5 нм. Приближение, описывающее образование систем с дискретными по размерам порами, коррелирует с моделью сборки фрактальных агрегатов по Жюльену с учетом особенностей реального эксперимента.

Системы из пористых наночастиц перспективны для применения в качестве катализаторов, адсорбентов, электродов и магнитных и фотоэлектрических материалов. Кроме того агрегированные наночастицы перспективны для использования в инкорпорированных и инкапсулированных нанокомпозитах, а также при создании специализированных ростовых платформ. В целом наноархитектоника с иерархическими дискретными пористыми системами представляет интерес для создания наноприборов нового поколения с распределенными различными функциями пористых каналов.

Список литературы

1. Porous Inorganic Nanomaterials: Their Evolution towards Hierarchical Porous Nanostructures / A. Jose, T. Mathew, N. Fernández-Navas, C. J. Querebillo // *Micro*. 2024. Vol. 4, № 2. P. 229–280. doi: 10.3390/micro4020016
2. Bridging the Gap Between Single Atoms, Atomic Clusters and Nanoparticles in Electrocatalysis: Hierarchical Structured Heterogeneous Catalysts / D. Bhalthia, A. Beniwal, P. K. Saravanan, P.-C. Chen, T.-Y. Chen // *ChemElectroChem*. 2024. Vol. 11, iss. 10. P. e202400034. doi: 10.1002/celec.202400034
3. Gerber I. C., Serp P. A theory/experience description of support effects in carbon-supported catalysts // *Chemical Reviews*. 2019. Vol. 120, iss. 2. P. 1250–1349. doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00209
4. Porous silicon with embedded metal oxides for gas sensing applications / V. A. Moshnikov, I. Gracheva, A. S. Lenshin, Yu. M. Spivak, M. G. Anchkov, V. V. Kuznetsov, J. M. Olchowik // *J. of non-crystalline solids*. 2012. Vol. 358, iss. 3. P. 590–595. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017
5. Surface functionality features of porous silicon prepared and treated in different conditions / Yu. M. Spivak,

- S. V. Mjakin, V. A. Moshnikov, M. F. Panov, A. O. Belorus, A. A. Bobkov // *J. of Nanomaterials*. 2016. Vol. 2016, iss. 1. P. 2629582. doi: 10.1155/2016/2629582
6. Mai H. D., Rafiq K., Yoo H. Nano metal-organic framework-derived inorganic hybrid nanomaterials: synthetic strategies and applications // *Chemistry—A European J.* 2017. Vol. 23, iss. 24. P. 5631–5651. doi: 10.1002/chem.201604703
7. Notario B., Pinto J., Rodriguez-Perez M. A. Nanoporous polymeric materials: A new class of materials with enhanced properties // *Progress in Materials Science*. 2016. Vol. 78. P. 93–139. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.02.002
8. Pal N. Nanoporous metal oxide composite materials: A journey from the past, present to future // *Advances in colloid and interface science*. 2020. Vol. 280. P. 102156. doi: 10.1016/j.cis.2020.102156
9. Nanocrystalline CeO₂ increases the activity of Au for CO oxidation by two orders of magnitude / S. Carrettin, P. Concepción, A. Corma, J. M. López Nieto, V. F. Puntes // *Angewandte Chemie International Edition*. 2004. Vol. 43, iss. 19. P. 2538–2540. doi: 10.1002/anie.200353570

10. Skandan G., Singhal A. Perspectives on the science and technology of nanoparticle synthesis // *Nanomaterials handbook*. 2006. P. 13–28. doi: 10.1201/9781420004014.ch2
11. Pt and Pd Nanoparticle Crystallization in the Sol-Gel-Derived Thin SiO₂ Films / N. Gubanova, V. Matveev, E. Grebenshchikova, D. Kirilenko, Y. Sazonova, O. Shilova // *Physchem*. 2023. Vol. 3, iss. 2. P. 259–269. doi: 10.3390/physchem3020018
12. Adelere I. A., Lateef A. A novel approach to the green synthesis of metallic nanoparticles: the use of agro-wastes, enzymes, and pigments // *Nanotechnology Reviews*. 2016. Vol. 5, iss. 6. P. 567–587. doi: 10.1515/ntrev-2016-0024
13. Green synthesis of nanoparticles and its potential application / I. Hussain, N. B. Singh, A. Singh, H. Singh, S. C. Singh // *Biotechnology Let.* 2016. Vol. 38. P. 545–560. doi: 10.1007/s10529-015-2026-7
14. Hierarchically porous materials: synthesis strategies and structure design / X.-Y. Yang, L.-H. Chen, Y. Li, J. C. Rooke, C. Sanchez, B.-L. Su // *Chemical Society Reviews*. 2017. Vol. 46, № 2. P. 481–558. doi: 10.1039/C6CS00829A
15. Бобков А. А., Кононова И. Е., Мошников В. А. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2017. 202 с.
16. Hierarchically structured porous materials: synthesis strategies and applications in energy storage / L. Wu, Y. Li, Zh. Fu, B.-L. Su // *National science review*. 2020. Vol. 7, iss. 11. P. 1667–1701. doi: 10.1093/nsr/nwaa183
17. Chen L. H., Li Y., Su B. L. Hierarchy in materials for maximized efficiency // *National Science Review*. 2020. Vol. 7, iss. 11. P. 1626–1630. doi: 10.1093/nsr/nwaa251
18. Universal Murray's law for optimised fluid transport in synthetic structures / B. Zhou, Q. Cheng, Z. Chen, Z. Chen, D. Liang, E. A. Munro, G. Yun, Y. Kawai, J. Chen, T. Bhowmick, P. K. Kannan, L. G. Occhipinti, H. Matsumoto, J. W. Gardner, B.-L. Su, T. Hasan // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15, № 1. Art. no. 3652. doi: 10.1038/s41467-024-47833-0
19. Kononova I., Kononov P., Moshnikov V. Step-by-step modeling and experimental study on the Sol-Gel porous structure of percolation nanoclusters // *Coatings*. 2023. Vol. 13, iss. 2. P. 449. doi: 10.3390/coatings13020449
20. The architectonics features of heterostructures for IR range detectors based on polycrystalline layers of lead chalcogenides / Yu. M. Spivak, I. E. Kononova, P. V. Kononov, V. A. Moshnikov, S. A. Ignat'ev // *Crystals*. 2021. Vol. 11, iss. 9. P. 1143. doi: 10.3390/cryst11091143
21. Maji S., Shrestha L. K., Ariga K. Nanoarchitectonics for hierarchical fullerene nanomaterials // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, iss. 8. P. 2146. doi: 10.3390/nano11082146
22. Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors / A. Bobkov, V. Luchinin, V. Moshnikov, S. Nalimova, Yu. Spivak // *Sensors*. 2022. Vol. 22, iss. 4. P. 1530. doi: 10.3390/s22041530
23. Ariga K. Progress in molecular nanoarchitectonics and materials nanoarchitectonics // *Molecules*. 2021. Vol. 26, iss. 6. P. 1621. doi: 10.3390/molecules26061621
24. Porous nanorods by stacked NiO nanoparticulate exhibiting corn-like structure for sustainable environmental and energy applications / V. Manjunath, S. Bimli, D. Singh, R. Biswas, P. N. Didwal, K. K. Halder, N. G. Deshpande, P. A. Bhobe, R. S. Devan // *RSC advances*. 2023. Vol. 13, iss. 32. P. 21962–21970. doi: 10.1039/D3RA03209D
25. Synthesis and electrochemical properties of mesoporous nickel oxide / W. Xing, F. Li, Z. Yan, G. Q. Lu // *J. of power sources*. 2004. Vol. 134, iss. 2. P. 324–330. doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.038
26. Farhadi S., Kazem M., Siadatnasab F. NiO nanoparticles prepared via thermal decomposition of the bis (dimethylglyoximate) nickel (II) complex: A novel reusable heterogeneous catalyst for fast and efficient microwave-assisted reduction of nitroarenes with ethanol // *Polyhedron*. 2011. Vol. 30, iss. 4. P. 606–613. doi: 10.1016/j.poly.2010.11.037
27. NiO nanorings and their unexpected catalytic property for CO oxidation / D. Wang, R. Xu, X. Wang, Y. Li // *Nanotechnology*. 2006. Vol. 17, № 4. P. 979. doi: 10.1088/0957-4484/17/4/023
28. Morphology effects on electrocatalysis of anodic water splitting on nickel (II) oxide / Z. Wu, M. Vagin, R. Boyd, B. Bakhit, G. Greczynski, M. Odén, E. M. Björk // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2022. Vol. 333. P. 111734. doi: 10.1016/j.micromeso.2022.111734
29. Pat. KR101635552B1 G01N27/3271. Nickel Oxide Nanostructures with High Surface Area and Its Application for Urease-based Biosensor. Publ. 01.07.2016.
30. Kundu M., Liu L. Electrospun porous nickel oxide nanofibers for high-performance electrochemical energy storage // *J. Nanosci. Let.* 2015. Vol. 5. P. 11–18.
31. Etefa H. F., Nemera D. J., Dejene F. B. Green synthesis of nickel oxide NPs incorporating carbon dots for antimicrobial activities // *ACS omega*. 2023. Vol. 8, iss. 41. P. 38418–38425. doi: 10.1021/acsomega.3c05204
32. Green synthesis of NiO nanoparticles using Aloe vera gel extract and evaluation of antimicrobial activity / B. Ahmad, M. I. Khan, M. A. Naeem, A. Alhodaib, M. Fatima, M. Amami, E. A. Al-Abbad, A. Kausar, N. Alwadai, A. Nazir, M. Iqbal // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 288. P. 126363. doi: 10.1016/j.matchemphys.2022.126363
33. Biosynthesis of NiO nanoparticles using *Spirogyra* sp. cell-free extract and their potential biological applications / Y. Singh, R. S. Sodhi, P. P. Singh, S. Kaushal // *Materials Advances*. 2022. Vol. 3, iss. 12. P. 4991–5000. doi: 10.1039/D2MA00114D
34. Mohammed M., Alkhazraji A. H. Synthesis and Characterization of Nickel Oxide Nanoparticles by Green as well as Chemical Routes and Comparisons their Properties // *Iraqi J. of Natural Sciences and Nanotechnology*. 2023. Vol. 4, iss. 1. P. 54–63. doi: 10.47758/ijn.v4i0.92

35. Получение наночастиц никеля методом "зеленого" синтеза / К. Халугарова, А. С. Комолов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, В. М. Кондратьев // Материалы науч.-техн. конф. "Микроэлектроника и информатика", Зеленоград, 20–21 апр. 2023 / Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники". М., 2023. С. 273–278.

36. Investigation of Particles Obtained by Green Synthesis Using Plant Extract / K. Khalugarova, V. M. Kondratev, A. Kuznetsov, A. Yu. Gagarina // Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023. P. 60–62. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424367

37. Maraeva E., Khalugarova K. Size analysis based on sorption study data for hydroxyapatite nanoparticles // Materials science forum. 2021. Vol. 1031. P. 172–177. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.172

38. Khalugarova K. N., Maraeva E. V., Moshnikov V. A. Study on the processes of nitrogen adsorption and capillary condensation in the powders of calcium hydroxyapatite // J. of Physics: Conf. Ser. 2019. Vol. 1400, iss. 3. P. 033003. doi: 10.1088/1742-6596/1400/3/033003

39. Everett D. H. Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry // Pure and Applied Chemistry. 1972. Vol. 31. P. 577–638. doi: 10.1351/pac197231040577

40. Richardson J. T., Scates R., Twigg M. V. X-ray diffraction study of nickel oxide reduction by hydrogen // Applied Catalysis A: General. 2003. Vol. 246, iss. 1. P. 137–150. doi: 10.1016/S0926-860X(02)00669-5

41. Кононова И. Е., Мошников В. А., Кононов П. В. Моделирование трехмерных пористых иерархических материалов, организованных посредством самосборки наносфер // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 5. С. 54–63.

42. Золь-гель технология микро- и нанокмпо- зитов / В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, Т. В. Хамова, О. А. Шилова. СПб.: Лань, 2013. 304 с.

43. Crystal growth by oriented attachment: kinetic models and control factors / X. Xue, R. L. Penn, E. R. Leite, F. Huang, Z. Lin // CrystEngComm. 2014. Vol. 16, iss. 8. P. 1419–1429. doi: 10.1039/C3CE42129E

Информация об авторах

Халугарова Камиля – аспирантка по направлению "Электроника, радиотехника и системы связи", младший научный сотрудник кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов: зеленый синтез; пористые материалы; наноструктуры.

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

E-mail: kamilya_kh@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9569-7821>

Спивак Юлия Михайловна – доктор технических наук (2022), доцент (2015), доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов: получение и характеристика наноматериалов; пористый кремний; атомно-силовая микроскопия; тераностика; тонкопленочные нанотехнологии.

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

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

Мошников Вячеслав Алексеевич – доктор физико-математических наук (1997), профессор (1999), профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 900 научных работ. Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (2007). 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: vamosnikov@mail.ru

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

References

1. Jose A., Mathew T., Fernández-Navas N., Querebillo C. J. Porous Inorganic Nanomaterials: Their Evolution towards Hierarchical Porous Nanostructures. Micro. 2024, vol. 4, no. 2, pp. 229–280. doi: 10.3390/micro4020016

2. Bhalothia D., Beniwal A., Saravanan P. K.,

Chen P.-C., Chen T.-Y. Bridging the Gap Between Single Atoms, Atomic Clusters and Nanoparticles in Electrocatalysis: Hierarchical Structured Heterogeneous Catalysts. ChemElectroChem. 2024, vol. 11, iss. 10, p. e202400034. doi: 10.1002/celc.202400034

3. Gerber I. C., Serp P. A Theory/Experience De-

scription of Support Effects in Carbon-Supported Catalysts. Chemical Reviews. 2019, vol. 120, iss. 2, pp. 1250–1349. doi: 10.1021/acs.chemrev.9b00209

4. Moshnikov V. A., Gracheva I., Lenshin A. S., Spivak Yu. M., Anchkov M. G., Kuznetsov V. V., Olchowik J. M. Porous Silicon with Embedded Metal Oxides for Gas Sensing Applications. J. of Non-Crystalline Solids. 2012, vol. 358, iss. 3, pp. 590–595. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017

5. Spivak Yu. M., Mjakin S. V., Moshnikov V. A., Panov M. F., Belorus A. O., Bobkov A. A. Surface Functionality Features of Porous Silicon Prepared and Treated in Different Conditions. J. of Nanomaterials. 2016, vol. 2016, iss. 1, p. 2629582. doi: 10.1155/2016/2629582

6. Mai H. D., Rafiq K., Yoo H. Nano Metal-Organic Framework-Derived Inorganic Hybrid Nanomaterials: Synthetic Strategies and Applications. Chemistry—A European J. 2017, vol. 23, iss. 24, pp. 5631–5651. doi: 10.1002/chem.201604703

7. Notario B., Pinto J., Rodriguez-Perez M. A. Nanoporous Polymeric Materials: A New Class of Materials with Enhanced Properties. Progress in Materials Science. 2016, vol. 78, pp. 93–139. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.02.002

8. Pal N. Nanoporous Metal Oxide Composite Materials: A Journey from the Past, Present to Future. Advances in Colloid and Interface Science. 2020, vol. 280, p. 102156. doi: 10.1016/j.cis.2020.102156

9. Carrettin S., Concepción P., Corma A., López Nieto J. M., Puentes V. F. Nanocrystalline CeO₂ Increases the Activity of Au for CO Oxidation by Two Orders of Magnitude. Angewandte Chemie International Edition. 2004, vol. 43, iss. 19, pp. 2538–2540. doi: 10.1002/anie.200353570

10. Skandan G., Singhal A. Perspectives on the Science and Technology of Nanoparticle Synthesis. Nanomaterials handbook. 2006, pp. 13–28. doi: 10.1201/9781420004014.ch2

11. Gubanova N., Matveev V., Grebenshchikova E., Kirilenko D., Sazonova Y., Shilova O. Pt and Pd Nanoparticle Crystallization in the Sol-Gel-Derived Thin SiO₂ Films. Physchem. 2023, vol. 3, iss. 2, pp. 259–269. doi: 10.3390/physchem3020018

12. Adelere I. A., Lateef A. A Novel Approach to the Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: The Use of Agro-Wastes, Enzymes, and Pigments. Nanotechnology Reviews. 2016, vol. 5, iss. 6, pp. 567–587. doi: 10.1515/ntrev-2016-0024

13. Hussain I., Singh N. B., Singh A., Singh H., Singh S. C. Green Synthesis of Nanoparticles and Its Potential Application. Biotechnology Let. 2016, vol. 38, pp. 545–560. doi: 10.1007/s10529-015-2026-7

14. Yang X.-Y., Chen L.-H., Li Y., Rooke J. C., Sanchez C., Su B.-L. Hierarchically Porous Materials: Synthesis Strategies and Structure Design. Chemical Society Reviews. 2017, vol. 46, no. 2, pp. 481–558. doi: 10.1039/C6CS00829A

15. Bobkov A. A., Kononova I. E., Moshnikov V. A. *Materialovedenie mikro- i nanosistem. Ierarkhicheskie struktury* [Materials Science of Micro- and Nanosys-

tems. Hierarchical Structures]. St Petersburg, *izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2017, 202 p. (In Russ.)

16. Wu L., Li Y., Fu Zh., Su B.-L. Hierarchically Structured Porous Materials: Synthesis Strategies and Applications in Energy Storage. National Science Review. 2020, vol. 7, iss. 11, pp. 1667–1701. doi: 10.1093/nsr/nwaa183

17. Chen L. H., Li Y., Su B. L. Hierarchy in Materials for Maximized Efficiency. National Science Review. 2020, vol. 7, iss. 11, pp. 1626–1630. doi: 10.1093/nsr/nwaa251

18. Zhou B., Cheng Q., Chen Z., Chen Z., Liang D., Munro E. A., Yun G., Kawai Y., Chen J., Bhowmick T., Kannan P. K., Occhipinti L. G., Matsumoto H., Gardner J. W., Su B.-L., Hasan T. Universal Murray's Law for Optimised Fluid Transport in Synthetic Structures. Nature Communications. 2024, vol. 15, no. 1, art. no. 3652. doi: 10.1038/s41467-024-47833-0

19. Kononova I., Kononov P., Moshnikov V. Step-by-Step Modeling and Experimental Study on the Sol-Gel Porous Structure of Percolation Nanoclusters. Coatings. 2023, vol. 13, iss. 2, p. 449. doi: 10.3390/coatings13020449

20. Spivak Yu. M., Kononova I. E., Kononov P. V., Moshnikov V. A., Ignat'ev S. A. The Architectonics Features of Heterostructures for IR Range Detectors Based in Polycrystalline Layers of Lead Chalcogenides. Crystals. 2021, vol. 11, iss. 9, p. 1143. doi: 10.3390/cryst11091143

21. Maji S., Shrestha L. K., Ariga K. Nanoarchitectonics for Hierarchical Fullerene Nanomaterials. Nanomaterials. 2021, vol. 11, iss. 8, p. 2146. doi: 10.3390/nano11082146

22. Bobkov A., Luchinin V., Moshnikov V., Nalimova S., Spivak Yu. Impedance Spectroscopy of Hierarchical Porous Nanomaterials Based on Por-Si, Por-Si Incorporated by Ni and Metal Oxides for Gas Sensors. Sensors. 2022, vol. 22, iss. 4, p. 1530. doi: 10.3390/s22041530

23. Ariga K. Progress in Molecular Nanoarchitectonics and Materials Nanoarchitectonics. Molecules. 2021, vol. 26, iss. 6, p. 1621. doi: 10.3390/molecules26061621

24. Manjunath V., Bimli S., Singh D., Biswas R., Didwal P. N., Haldar K. K., Deshpande N. G., Bhobe P. A., Devan R. S. Porous Nanorods by Stacked NiO Nanoparticulate Exhibiting Corn-Like Structure for Sustainable Environmental and Energy Applications. RSC Advances. 2023, vol. 13, iss. 32, pp. 21962–21970. doi: 10.1039/D3RA03209D

25. Xing W., Li F., Yan Z., Lu G. Q. Synthesis and Electrochemical Properties of Mesoporous Nickel Oxide. J. of Power Sources. 2004, vol. 134, iss. 2, pp. 324–330. doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.038

26. Farhadi S., Kazem M., Siadatnasab F. NiO Nanoparticles Prepared via Thermal Decomposition of the Bis (Dimethylglyoximate) Nickel (II) Complex: A Novel Reusable Heterogeneous Catalyst for Fast and Efficient Microwave-Assisted Reduction of Nitroarenes With Ethanol. Polyhedron. 2011, vol. 30, iss. 4, pp. 606–613. doi: 10.1016/j.poly.2010.11.037

27. Wang D., Xu R., Wang X., Li Y. NiO Nanorings and Their Unexpected Catalytic Property for

CO Oxidation. Nanotechnology. 2006, vol. 17, no. 4, p. 979. doi: 10.1088/0957-4484/17/4/023

28. Wu Z., Vagin M., Boyd R., Bakhit B., Greczynski G., Odén M., Björk E. M. Morphology Effects on Electrocatalysis of Anodic Water Splitting on Nickel (II) Oxide. Microporous and Mesoporous Materials. 2022, vol. 333, p. 111734. doi: 10.1016/j.micromeso.2022.111734

29. Pat. KR10163552B1 G01N27/3271. Nickel Oxide Nanostructures with High Surface Area and Its Application for Urease-based Biosensor. Publ. 01.07.2016.

30. Kundu M., Liu L. Electrospun Porous Nickel Oxide Nanofibers for High-Performance Electrochemical Energy Storage. J. Nanosci. Let. 2015, vol. 5, pp. 11–18.

31. Etefa H. F., Nemer D. J., Dejene F. B. Green Synthesis of Nickel Oxide NPs Incorporating Carbon Dots for Antimicrobial Activities. ACS Omega. 2023, vol. 8, iss. 41, pp. 38418–38425. doi: 10.1021/acsomega.3c05204

32. Ahmad B., Khan M. I., Naeem M. A., Alhodaib A., Fatima M., Amami M., Al-Abbad E. A., Kausar A., Alwada'i N., Nazir A., Iqbal M. Green Synthesis of NiO Nanoparticles Using Aloe Vera Gel Extract and Evaluation of Antimicrobial Activity. Materials Chemistry and Physics. 2022, vol. 288, p. 126363. doi: 10.1016/j.matchemphys.2022.126363

33. Singh Y., Sodhi R. S., Singh P. P., Kaushal S. Biosynthesis of NiO Nanoparticles Using Spirogyra Sp. Cell-Free Extract and Their Potential Biological Applications. Materials Advances. 2022, vol. 3, iss. 12, pp. 4991–5000. doi: 10.1039/D2MA00114D

34. Mohammed M., Alkhazraji A. H. Synthesis and Characterization of Nickel Oxide Nanoparticles by Green as well as Chemical Routes and Comparisons their Properties. Iraqi J. of Natural Sciences and Nanotechnology. 2023, vol. 4, iss. 1, pp. 54–63. doi: 10.47758/ijn.v4i0.92

35. Khalugarova K., Komolov A. S., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A., Kondratev V. M. Obtaining Nickel Nanoparticles by Green Synthesis Method. Proc of the conf. "Microelectronics and Computer Science", Zelenograd, 20–21 Apr. 2023. Moscow, *Natsional'nyi issle-*

dovatel'skii universitet "Moskovskii institut elektronnoi tekhniki", 2023, pp. 273–278. (In Russ.)

36. Khalugarova K., Kondratev V. M., Kuznetsov A., Gagarina A. Yu. Investigation of Particles Obtained by Green Synthesis Using Plant Extract. Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023, pp. 60–62. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424367

37. Maraeva E., Khalugarova K. Size Analysis Based on Sorption Study Data for Hydroxyapatite Nanoparticles. Materials Science Forum. 2021, vol. 1031, pp. 172–177. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1031.172

38. Khalugarova K. N., Maraeva E. V., Moshnikov V. A. Study on the Processes of Nitrogen Adsorption and Capillary Condensation in the Powders of Calcium Hydroxyapatite. J. of Physics: Conf. Ser. 2019, vol. 1400, iss. 3, p. 033003. doi: 10.1088/1742-6596/1400/3/033003

39. Everett D. H. Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry. Pure and Applied Chemistry. 1972, vol. 31, pp. 577–638. doi: 10.1351/pac197231040577

40. Richardson J. T., Scates R., Twigg M. V. X-Ray Diffraction Study of Nickel Oxide Reduction by Hydrogen. Applied Catalysis A: General. 2003, vol. 246, iss. 1, pp. 137–150. doi: 10.1016/S0926-860X(02)00669-5

41. Kononova I. E., Moshnikov V. A., Kononov P. V. Modeling of Three-Dimensional Hierarchical Porous Materials Organized by Means of Nanosphere Self-Assembly. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2017, no. 5, pp. 54–63. (In Russ.)

42. Moshnikov V. A., Tairov Yu. M., Khamova T. V., Shilova O. A. Sol-Gel Technology of Micro- and Nanocomposites. SPb, *Izd. "Lan"*, 2013, 304 p. (In Russ.)

43. Xue X., Penn R. L., Leite E. R., Huang F., Lin Z. Crystal Growth by Oriented Attachment: Kinetic Models and Control Factors. CrystEngComm. 2014, vol. 16, iss. 8, p. 1419–1429. doi: 10.1039/C3CE42129E

Information about the authors

Kamiliya Khalugarova, Postgraduate student in "Electronics, Radio Engineering and Communication Systems", Junior Researcher of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: green synthesis; porous materials; nanostructures.

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

E-mail: kamiliya_kh@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9569-7821>

Yulia M. Spivak, Dr. Sci. (Eng.) (2022), Assistant Professor (2015), Assistant Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 170 scientific publications. Area of expertise: synthesis and characterization of nanomaterials; porous silicon; atomic force microscopy; theranostics; thin-film nanotechnology.

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

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

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 900 scientific publications. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2007). 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>