

Микро- и наноэлектроника

УДК 47.09

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-47-53>

Особенности применения сорбционного анализа для исследования различных наноматериалов электроники в зависимости от состава и технологических условий получения

А. С. Леньшин¹, Е. В. Мараева^{2✉}

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ jenvmar@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время сорбционные методы анализа, включая метод тепловой десорбции инертных газов, широко применяются для характеристики параметров пористой структуры наноматериалов широкого спектра функционального назначения. Тепловая десорбция азота относится к группе неразрушающих методик, обеспечивающих экспресс-анализ таких параметров наноматериалов, как удельная поверхность, средний размер частиц, распределение мезопор по размерам, наличие или отсутствие микропор в системе. В данной статье в качестве объектов исследования выбраны порошки мезопористого кремния и гидроксипатита кальция. Наноструктуры на основе мезо- и нанопористого кремния представляют интерес при реализации фильтров для систем волоконно-оптической связи, поскольку современные интерференционные оптические фильтры громоздки в использовании и дороги. Гидроксипатит потенциально обеспечивает высокую коррозионную стойкость и не токсичен для окружающей среды. Антикоррозионные покрытия на его основе имеют решающее значение для практического применения магниевых сплавов, которые используются для уменьшения массы транспортных средств, самолетов, корпусов электроники.

Цель работы. Рассмотрение особенностей применения метода тепловой десорбции инертных газов, в частности азота, для исследования параметров пористой структуры наноматериалов различного состава на примере мезопористого кремния и гидроксипатита.

Материалы и методы. Применение метода тепловой десорбции инертных газов и капиллярной конденсации для исследования параметров пористой структуры порошков гидроксипатита и пористого кремния. Метод тепловой десорбции азота реализован с помощью прибора Сорби МС, оснащенного станцией пробоподготовки Сорби Преп.

Результаты. Предложены рекомендации по выбору массы материала-адсорбента, требуемой для исследования, выбору условий пробоподготовки и диапазона изменения относительного парциального давления газа-адсорбата. Установлено, что выбранные типы образцов характеризуются отсутствием системы микропор в структуре. Проанализирована зависимость удельной поверхности порошков гидроксипатита и параметров его мезопористой структуры от условий термообработки.

Заключение. Исследование процессов адсорбции и капиллярной конденсации азота позволяет воспроизводить параметры пористой структуры гидроксипатита и пористого кремния, что является важным показателем для их применения в медицине и электронике в качестве антикоррозионных покрытий и для реализации оптических фильтров.

Ключевые слова: удельная поверхность, пористые материалы, сорбционный анализ, пористый кремний, гидроксипатит

Для цитирования: Леньшин А. С., Мараева Е. В. Особенности применения сорбционного анализа для исследования различных наноматериалов электроники в зависимости от состава и технологических условий получения // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 47–53. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-47-53

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа частично выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-72-10007 и в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZGU-2020-0036, реализуемых в Воронежском государственном университете.

Статья поступила в редакцию 30.09.2021; принята к публикации после рецензирования 03.11.2021; опубликована онлайн 28.02.2022

© Леньшин А. С., Мараева Е. В., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Application of Sorption Analysis in the Study of Various Nanomaterials Used in Electronics Depending on their Composition and Production Conditions

Alexander S. Lenshin ¹, Evgeniya V. Maraeva ²✉

¹ Voronezh State University, Voronezh, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ jenvmar@mail.ru

Abstract

Introduction. At present, sorption methods of analysis, including the thermal desorption of inert gases, are widely adopted to characterize the porous structure parameters of nanomaterials having a wide range of applications. Nitrogen thermal desorption belongs to the group of non-destructive techniques that provide a rapid analysis of the following parameters exhibited by nanomaterials: specific surface area, average particle size, mesopore size distribution, as well as the presence or absence of micropores in the system. In this work, mesoporous silicon and calcium hydroxyapatite powders are selected as the objects of research. Since modern interference optical filters are cumbersome and expensive to use, meso- and nanoporous silicon nanostructures are of interest in the implementation of filters for fiber-optic communication systems. Hydroxyapatite can potentially provide high corrosion resistance while posing no risk of toxicity to the environment. In addition, anticorrosion hydroxyapatite coatings are of decisive importance for the practical application of magnesium alloys used to reduce the weight of vehicles, aircraft, and electronics housings.

Aim. To consider the application of the thermal desorption of inert gases, specifically nitrogen thermal desorption, in the study of the porous structure parameters of nanomaterials having various compositions on the example of mesoporous silicon and hydroxyapatite.

Materials and methods. In this work, the thermal desorption of inert gases and capillary condensation were applied to study the porous structure parameters of hydroxyapatite and porous silicon powders. In particular, the nitrogen thermal desorption method was implemented using a Sorbi MS instrument equipped with a Sorbi Prep sample preparation station.

Results. Recommendations are provided on choosing the mass of the adsorbent material required for the study, the sample preparation conditions, as well as the relative partial pressure range of the gas adsorbate. The selected sample types were found to lack a micropore system in the structure. Finally, the dependence of the specific surface area of hydroxyapatite powders and the parameters of its mesoporous structure on heat treatment conditions was analyzed.

Conclusion. The study of nitrogen adsorption and capillary condensation allows the porous structure parameters of hydroxyapatite and porous silicon to be reproduced, which is of great importance for their use in medicine and radio electronics as anticorrosion coatings, as well as for the implementation of optical filters.

Keywords: specific surface area, porous materials, sorption analysis, porous silicon, hydroxyapatite

For citation: Lenshin A. S., Maraeva E. V. Application of Sorption Analysis in the Study of Various Nanomaterials Used in Electronics Depending on their Composition and Production Conditions. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 47–53. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-47-53

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

Acknowledgments. The work was partially supported by a grant of Russian Science Foundation No. 19-72-10007 and a state task of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZGU-2020-0036.

Submitted 30.09.2021; accepted 03.11.2021; published online 28.02.2022

Введение. Нанопорошки пористого кремния характеризуются высокой удельной поверхностью, которая обуславливает повышенную реакционную способность указанного материала. Ультрадисперсные порошки кремния находят широкое применение в химической индустрии в качестве ката-

литических добавок и адсорбентов, используются при производстве керамики и цементов, применяются в различных областях медицины, а также при реализации фильтров для систем волоконно-оптической связи [1, 3–7]. Так, в [1] реализованы прототипы загрязняющих фильтров ближнего ульт-

трафиолетового и видимого диапазонов, в том числе – загрязжающий фильтр на основе плазмонного резонанса в композиционных наноструктурированных слоях "пористый кремний – серебро".

Биосовместимые порошки на основе гидроксидов апатитов (ГАП) применяются для изготовления биокерамики. ГАП кальция широко используется в таких областях медицины, как стоматология и костная инженерия, в качестве дефектозамещающего материала [8–13]. Важным направлением является создание антикоррозионных покрытий на основе ГАП. Так, в [2] на чистом магнии и его сплавах успешно сформированы кристаллические покрытия ГАП. Исследование процессов адсорбции и капиллярной конденсации азота позволяет воспроизводить параметры пористой структуры ГАП.

В настоящее время сорбция азота при 77 К является стандартным инструментом, позволяющим анализировать материалы с порами в диапазоне размеров 0.5...50 нм. Механизм сорбции азота при 77 К может быть изложен следующим образом. При низком относительном давлении (0.02...0.1) начинается заполнение микропор адсорбатом. Адсорбция монослоя происходит после завершения адсорбции в микропорах. Капиллярная конденсация начинает проявляться в относительно небольших мезопорах, когда относительное давление и ширина пор соответствуют уравнению Кельвина. Изотерма десорбции получается обращением процесса адсорбции, высвобождением жидкого адсорбата и уменьшением равновесного относительного давления [14, 15]. Процесс испарения происходит с мениска конденсированной жидкости.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей применения метода тепловой десорбции инертных газов, в частности, азота, для исследования параметров пористой структуры наноматериалов различного состава на примере мезопористого кремния и ГАП кальция.

Материалы и методы. Порошки на основе пористого кремния были получены в Воронежском государственном университете из пластин как p -, так и n -типа электропроводности. Измельчение порошков осуществлялось ультразвуковым, электрохимическим и механическим воздействием.

Порошки ГАП были получены методом химического осаждения. Установка по гидрохимическому осаждению включает: магнитную мешалку с подогревом ES-61201, циркуляционный термостат LOIP LT-208, инертный держатель реакционной ванны (собственная сборка). В качестве исходных прекурсоров были выбраны нитрат кальция и гидроортофосфат аммония. В некоторых случаях по-

лучаемые структуры подвергались микроволновому излучению [9, 11].

Сорбционные характеристики наноматериалов исследовались с использованием прибора Сорби МС, оснащенного станцией пробоподготовки Сорби Преп (ЗАО "МЕТА", Россия, Новосибирск).

При исследовании параметров пористой структуры наноматериалов сорбционным методом важно правильно оценить массу материала-адсорбента, требуемого для исследования, выбрать режим пробоподготовки и установить диапазон изменения относительного парциального давления газа-адсорбата, при которых будет проводиться измерение.

1. Определение массы исследуемого материала и подготовка навески.

При исследовании композиций методом тепловой десорбции азота выбор массы исследуемого материала определяется двумя факторами: возможностью получения устойчивого сигнала десорбции, по которому проводится расчет объема десорбированного газа, и диапазоном полной измеряемой поверхности.

2. Выбор режимов и проведение пробоподготовки исследуемого материала.

Пробоподготовка исследуемого материала, как правило, заключается в контролируемом нагреве образца в потоке инертного газа (гелия). Подготовка необходима, в первую очередь, для удаления влаги и поверхностных загрязнений. Варьируемыми режимами пробоподготовки являются температура нагрева и время.

3. Проведение измерения в заданном диапазоне относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 .

Выбор диапазона значений p/p_0 определяется исследуемым параметром пористой структуры. Измерение удельной поверхности по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), внешней поверхности и построение распределения мезопор по размерам предполагают выбор разных режимов исследования.

Так, например, на приборе Сорби МС, используемом в настоящей работе, выбираются следующие параметры:

– удельная поверхность – метод БЭТ, диапазон относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 от 6 до 20 %;

– индикация наличия микропор (поры размером менее 2 нм) – сравнительный t -метод анализа де Бура, диапазон относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 от 15 до 40 %;

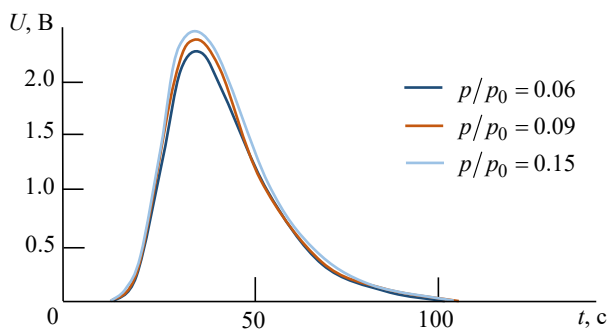


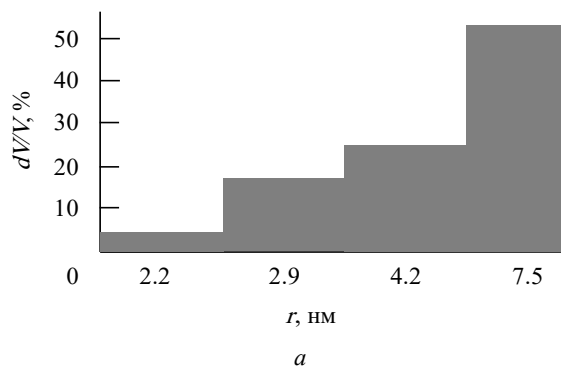
Рис. 1. Линии тепловой десорбции азота, наблюдаемые на начальном этапе исследования порошка мезопористого кремния с удельной поверхностью 400 м²/г

Fig. 1. Nitrogen thermal desorption lines observed at the initial stage of studying mesoporous silicon powder having a specific surface area of 400 м²/g

– распределение мезопор по размерам – метод капиллярной конденсации инертного газа, диапазон относительных парциальных давлений газа-адсорбата p/p_0 от 6 до 97 %.

Результаты. В ходе работы были исследованы параметры пористой структуры наноматериалов различного состава (кремний, ГАП), характеризующиеся разным значением удельной поверхности.

В рамках работы была исследована серия изотерм адсорбций в диапазоне относительных парциальных давлений газа-адсорбата (азота), определена удельная поверхность каждого образца стандартным методом (БЭТ) и оценено наличие/отсутствие микропор в образце. На рис. 1 представлены линии десорбции азота, полученные на образцах мезопористого кремния, площадь каждого формируемого пика пропорциональна объему адсорбированного/десорбированного газа. Для примера показаны линии, полученные при относительном парциальном давлении газа-адсорбата в рамках границы применимости модели БЭТ.



В ходе исследования порошков мезопористого кремния выяснилось, что существенным ограничением для анализа может выступать недостаточная масса образца. Рекомендуемые значения массы навески при выборе данного метода исследования для получения устойчивого сигнала десорбции составляют не менее 5 мг. Рекомендуемые режимы пробоподготовки – 473 К, 40 мин. Рекомендуемый диапазон относительного парциального давления адсорбата – от 5 до 98 %. Превышение давления адсорбируемого газа выше 98 % приводит к нестабильной работе регулятора расхода газа и может быть причиной неправильного анализа данных. Исследования в более узком диапазоне (от 5 до 40 %), традиционно используемом в сорбционном анализе для исследования микропор, не представляются рациональными, так как порошки характеризуются отсутствием системы пор менее 2 нм. Исследования показали, что удельная поверхность порошков мезопористого кремния, полученных измельчением, отвечает диапазону 60... 500 мг²/г.

В рамках исследования серии образцов ГАП была проанализирована зависимость удельной поверхности порошков (таблица) и параметров мезопористой структуры (рис. 2, а, б) от условий термообработки.

Значения удельной площади поверхности для образцов гидроксиапатита

Specific surface area values for hydroxyapatite samples

T, K	$t, \text{мин}$	$S_{\text{БЭТ}}, \text{м}^2/\text{г}$
Без отжига	–	54
423	60	81
573	60	90
873	60	49
1173	60	7

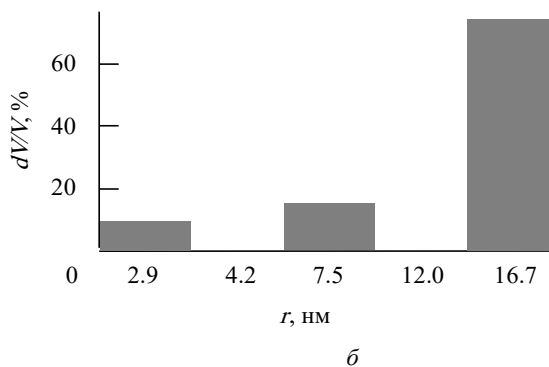


Рис. 2. Гистограмма распределения пор для образца ГАП: а – без термообработки; б – с термообработкой при температуре 1173 К

Fig. 2. Pore distribution histogram for hydroxyapatite: а – without heat treatment; б – with heat treatment at temperature 1173 К

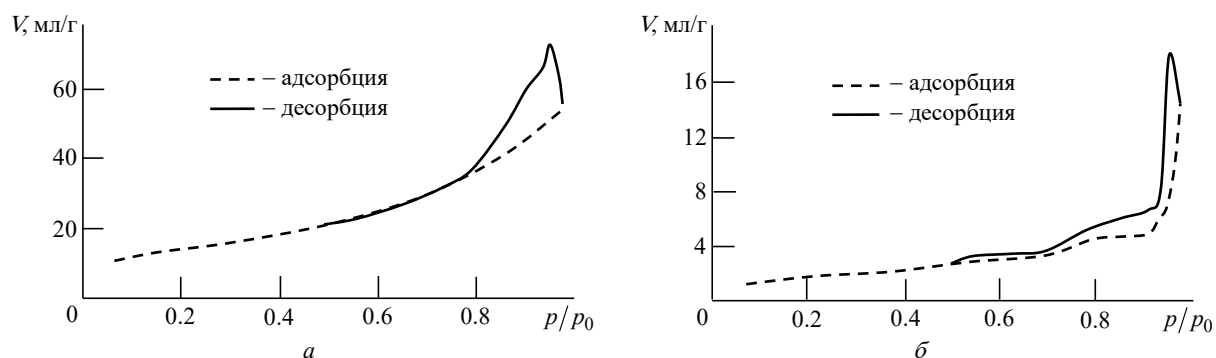


Рис. 3. Полная изотерма адсорбции для ГАП: *a* – без термообработки; *б* – с термообработкой при температуре 1173 К

Fig. 3. Complete adsorption isotherm for hydroxyapatite: *a* – without heat treatment; *b* – heat-treated at 1173 K

Рекомендуемое значение массы образцов ГАП для исследования методом тепловой десорбции азота составляет от 150 до 1000 мг в зависимости от режима термообработки. Условия пробоподготовки образцов – 423 К, 60 мин.

Гистограммы распределения мезопор по размерам были построены на основе анализа полных изотерм адсорбции азота на порошках ГАП. На рис. 3, *a*, *б* для примера приведены изотермы адсорбции азота для ГАП без термообработки и с термообработкой при температуре 1173 К.

Сопоставляя данные, приведенные в таблице, с данными, представленными на рис. 2, 3, можно сделать вывод, что убывание удельной поверхности при температуре 1173 К обусловлено разрастанием пор, что согласуется с гистограммой распределения пор по размерам (см. рис. 2) и исчезновением системы пор со средним радиусом 4.2 и 12 нм при спекании (или укрупнении частиц). Относительно небольшая удельная поверхность образца без термообработки объясняется наличием влаги, которая была удалена во всех остальных образцах.

Заключение. В статье описаны особенности применения метода тепловой десорбции инертных газов для исследования наноматериалов различного состава на примере мезопористого кремния и ГАП.

Подобраны рекомендуемые значения массы для получения устойчивого сигнала десорбции и рекомендуемые режимы пробоподготовки для исследования мезопористого кремния и ГАП. Как правило, при исследовании материалов методом тепловой десорбции инертных газов существенным ограничением для анализа может выступать недостаточная масса образца. В случае исследования наноматериалов с высокой удельной поверхностью, наоборот, слишком большая масса адсорбента может привести к получению некорректного сигнала датчика по теплопроводности и усечению пика.

Исследование сорбционных характеристик обеспечивает возможность быстрого и недорогого анализа структурных свойств ГАП, пористого кремния и других порошковых наноматериалов, используемых в радиоэлектронике.

Список литературы

1. Магнитные и плазмонные композиционные наноструктуры для реализации оптических фильтров в системах контроля и диагностики веществ и материалов / Р. С. Смердов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, А. С. Мустафаев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 81–97. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97
2. Hiromoto S., Yamamoto A. High corrosion resistance of magnesium coated with hydroxyapatite directly synthesized in an aqueous solution // *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 54, № 27. P. 7085–7093. doi: 10.1016/j.electacta.2009.07.033
3. Porous Silicon as a Nanomaterial for Disperse Transport Systems of Targeted Drug Delivery to the Inner Ear / Yu. M. Spivak, A. O. Belorus, A. A. Panevin,

- S. Zhuravskii, V. A. Moshnikov, K. Beshpalova, P. A. Somov, Yu. Zhukov, A. S. Kolomov, L. V. Chistykova, N. Grigoryeva // *Technical Physics*. 2018. Vol. 63. P. 1352–1360. doi: 10.1134/S1063784218090207
4. Porous silicon as efficient surface enhanced Raman scattering (SERS) substrate / F. Giorgis, E. Descrovi, A. Chioldoni, E. Froner, M. Scarpa, A. Venturello, F. Geobaldo // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254, № 22. P. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029
5. Low-frequency dielectric relaxation in structures based on macroporous silicon with meso-macroporous skin-layer / R. Castro, Yu. Spivak, S. Shevchenko, V. Moshnikov // *Materials*. 2021. Vol. 16, № 10. P. 2473. doi: 10.3390/ma14102471

6. Experimental study of structural and optical properties of integrated MOCVD GaAs/Si(001) heterostructures / P. V. Seredin, A. S. Lenshin, D. S. Zolotukhin, I. N. Arsentyev, D. N. Nikolaev, A. V. Zhabotinskiy // *Physica B: Condensed Matter*. 2018. Vol. 530. P. 30–37. doi: 10.1016/j.physb.2017.11.028

7. Lenshin A. S., Polkovnikova Y. A., Seredin P. V. Study of the deposition process of vinpocetine on the surface of porous silicon // *Results in Physics*. 2016. Vol. 6. P. 337–338. doi: 10.1016/j.rinp.2016.06.008

8. Saxena V., Hasan A., Pandey L. M. Effect of integration with hydroxyapatite: a review // *Materials technology*. 2018. Vol. 33, № 2. P. 79–92. doi: 10.1080/10667857.2017.1377972

9. Maraeva E. V., 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

10. Dou L. B., Zhang Y. C., Sun H. W. Advances in Synthesis and Functional Modification of Nanohydroxyapatite // *J. of Nanomaterials*. 2018. Vol. 2018. P. 1–8. doi: 10.1155/2018/3106214

11. Evaluation of hemocompatibility and in vitro immersion on microwave-assisted hydroxyapatite-

alumina nanocomposites / G. Radha, S. Balakumar, B. Venkatesan, E. Vellaichamy // *Materials Science and Engineering: C*. 2015. Vol. 50. P. 143–150. doi: 10.1016/j.msec.2015.01.054

12. 3D printing of ceramics: a review / Z. W. Chen, Z. Y. Li, J. J. Li, Ch. Liu, Ch. Lao, Yu. Fu, Ch. Liu, Ya. Li, P. Wang, Y. He // *J. of the European Ceramic Society*. 2019. Vol. 39, № 4. P. 661–687. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013

13. Galindo T. G. P., Chai Y. D., Tagaya M. Hydroxyapatite Nanoparticle Coating on Polymer for Constructing Effective Biointeractive Interfaces // *J. of Nanomaterials*. 2019. Vol. 2019. P. 1–24. doi: 10.1155/2019/6495239

14. Zelenka T. Adsorption and desorption of nitrogen at 77 K on micro- and mesoporous materials: Study of transport kinetics // *J. of Microporous and Mesoporous Materials*. 2016. Vol. 227. P. 202–209. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.03.009

15. Wang G, Wang K, Ren T. Improved analytic methods for coal surface area and pore size distribution determination using 77 K nitrogen adsorption experiment // *Intern. J. of Mining Science and Technology*. 2014. Vol. 24, № 3. P. 329–334. doi: 10.1016/j.ijmst.2014.03.007

Информация об авторах

Леньшин Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук (2020), ведущий научный сотрудник кафедры физики твердого тела и теплоэнергетики, доцент кафедры физики теплотехники и теплоэнергетики Воронежского государственного университета инженерных технологий. Автор 127 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнологии и наноматериалы; электрохимия; пористый кремний. Адрес: Воронежский государственный университет, Университетская пл., д. 1, Воронеж, 394018, Россия
E-mail: lenshinas@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>

Мараева Евгения Владимировна – кандидат физико-математических наук (2014), доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 86 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнологии и наноматериалы; пористые материалы и методы сорбционного анализа; халькогениды свинца. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 литера Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: jenvmar@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0000-7953>

References

1. Smerdov R. S., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A., Mustafaev A. S. Magnetic and Plasmonic Composite Nanostructures for Creating Optical Filters at Substance and Material Diagnostics Systems. *J. of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 81–97. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97 (In Russ.)

2. Hiromoto S., Yamamoto A. High Corrosion Resistance of Magnesium Coated with Hydroxyapatite Directly Synthesized in an Aqueous Solution. *Electrochimica Acta*. 2009, vol. 54, no. 27, pp. 7085–7093. doi: 10.1016/j.electacta.2009.07.033

3. Spivak Yu. M., Belorus A. O., Panevin A. A., Zhuravskii S., Moshnikov V. A., Bespalova K., So-

mov P. A., Zhukov Yu., Kolomov A. S., Chistykh L. V., Grigoryeva N. Porous Silicon as a Nanomaterial for Disperse Transport Systems of Targeted Drug Delivery to the Inner Ear. *Technical Physics*. 2018, vol. 63, pp. 1352–1360. doi: 10.1134/S1063784218090207

4. Giorgis F., Descrovi E., Chiodoni A., Froner E., Scarpa M., Venturello A., Geobaldo F. Porous Silicon as Efficient Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) Substrate. *Applied Surface Science*. 2008, vol. 254, no. 22, pp. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029

5. Castro R, Spivak Yu., Shevchenko S., Moshnikov V. Low-Frequency Dielectric Relaxation in Structures Based on Macroporous Silicon with Meso-Macroporous Skin-

Layer. Materials. 2021, vol. 16, no. 10, p. 2473. doi: 10.3390/ma14102471

6. Seredin P. V., Lenshin A. S., Zolotukhin D. S., Arsenyev I. N., Nikolaev D. N., Zhabotinskiy A. V. Experimental Study Of Structural and Optical Properties of Integrated MOCVD GaAs/Si(001) Heterostructures. Physica B: Condensed Matter. 2018, vol. 530, pp. 30–37. doi: 10.1016/j.physb.2017.11.028

7. Lenshin A. S., Polkovnikova Y. A., Seredin P. V. Study of the Deposition Process of Vinpocetine on the Surface of Porous Silicon. Results in Physics. 2016, vol. 6, pp. 337–338. doi: 10.1016/j.rinp.2016.06.008

8. Saxena V., Hasan A., Pandey L. M. Effect of Integration with Hydroxyapatite: a Review. Materials technology. 2018, vol. 33, no. 2, pp. 79–92. doi: 10.1080/10667857.2017.1377972

9. Maraeva E. V., 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

10. Dou L. B., Zhang Y. C., Sun H. W. Advances in Synthesis and Functional Modification of Nanohydroxyapatite. J. of Nanomaterials. 2018, vol. 2018, pp. 1–8. doi: 10.1155/2018/3106214

11. Radha G., Balakumar S., Venkatesan B., Velaiachamy E. Evaluation of Hemocompatibility and in Vitro Immersion on Microwave-Assisted Hydroxyapatite–Alumina Nanocomposites. Materials Science and Engineering: C. 2015, vol. 50, pp. 143–150. doi: 10.1016/j.msec.2015.01.054

12. Chen Z. W., Li Z. Y., Li J. J., Liu Ch., Lao Ch., Fu Yu., Liu Ch., Li Ya., Wang P., He Y. 3D Printing of Ceramics: a Review. J. of the European Ceramic Society. 2019, vol. 39, no. 4, pp. 661–687. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013

13. Galindo T. G. P., Chai Y. D., Tagaya M. Hydroxyapatite Nanoparticle Coating on Polymer for Constructing Effective Biointeractive Interfaces. J. of Nanomaterials. 2019, vol. 2019, pp. 1–24. doi: 10.1155/2019/6495239

14. Zelenka T. Adsorption and Desorption of Nitrogen at 77 K on Micro- and Mesoporous Materials: Study of Transport Kinetics. J. of Microporous and Mesoporous Materials. 2016, vol. 227, pp. 202–209. doi: 10.1016/j.micromeso.2016.03.009

15. Wang G, Wang K, Ren T. Improved Analytic Methods for Coal Surface Area and Pore Size Distribution Determination Using 77K Nitrogen Adsorption Experiment. Intern. J. of Mining Science and Technology. 2014, vol. 24, no. 3, pp. 329–334. doi: 10.1016/j.ijmst.2014.03.007

Information about the authors

Alexander S. Lenshin, Dr Sci (Phys. and Math.) (2020), Lead Researcher, Voronezh State University, Associate Professor at the Engineering Technologies Department of Voronezh State University The author of 127 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology and nanomaterials; electrochemistry, porous silicon. Address: Voronezh State University, 1 Universitetskaya Sq., Voronezh 394018, Russia
E-mail: lenshinas@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>

Evgeniya V. Maraeva, Cand. Sci. (Phys. and Math.) (2014), Associate Professor at the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 86 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology and nanomaterials; porous materials and methods of sorption analysis; lead chalcogenides. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: jenvmar@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0000-7953>