

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-457-462

УДК 539.234

Особенности морфологии микро- и нанопористых пленок меди и серебра для фотокаталитического применения, синтезированных с использованием реакции замещения

Павел Андреевич Безруков¹, Алексей Викторович Нашекин²,
 Николай Валентинович Никоноров³, Александр Иванович Сидоров⁴✉

^{1,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

¹ pawqa1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5415-8749>

² nashchekin@mail.ioffe.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2542-7364>

³ Nikonorov@oi.ifmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

⁴ sidorov@oi.ifmo.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-8730-4389>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты экспериментального исследования морфологии тонких микро- и нанопористых пленок серебра и меди, синтезированных с использованием реакции замещения. **Метод.** Синтез пленок серебра осуществлен путем погружения полированных пластин из меди марки М1 в раствор азотнокислого серебра. Пленки меди погружались в раствор медного купороса подложек из электролитического железа, а также из железа, покрытого путем вакуумного напыления слоем олова толщиной 5 мкм. Изучение морфологии синтезированных пленок выполнено с помощью сканирующего электронного микроскопа. **Основные результаты.** Исследования показали, что через 2 с после начала реакции на подложках формируются металлические пленки толщиной примерно 1 мкм, которые состоят из кристаллических микро- и нанодендритов. Пленки из серебра содержат кристаллические пластины серебра с поперечным размером до 2 мкм. При увеличении продолжительности реакции происходит уплотнение слоя металла. Минимальный размер пор при этом составляет 20 нм. **Практическая значимость.** Синтезированные пленки могут служить основой для создания микро- и наноструктур полупроводник-металл, предназначенных для фотокаталитического разложения воды. Пленки могут быть использованы в био- и химических сенсорах для усиления рамановского рассеяния.

Ключевые слова

морфология, структура, пористая пленка, серебро, медь, реакция замещения

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00559).

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием оборудования Федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях», поддержанного Минобрнауки России.

Ссылка для цитирования: Безруков П.А., Нашекин А.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Особенности морфологии микро- и нанопористых пленок меди и серебра для фотокаталитического применения, синтезированных с использованием реакции замещения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 4. С. 457–462. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-457-462

Features of the morphology of micro- and nanoporous copper and silver films synthesized by substitution reaction for photocatalytic application

Pavel A. Bezrukov¹, Alexey V. Nashchekin², Nikolay V. Nikonorov³, Alexander I. Sidorov⁴✉

^{1,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

¹ pawqa1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5415-8749>

² nashchekin@mail.ioffe.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2542-7364>

³ Nikonorov@oi.ifmo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

⁴ sidorov@oi.ifmo.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-8730-4389>

Abstract

The paper presents the results of an experimental investigation of the morphology of copper and silver thin films synthesized by the substitution reaction method. Silver films were synthesized by immersing polished substrates of copper (M1 brand) into silver nitrate solution. Copper films were synthesized by immersing substrates of iron (electrolytic iron brand) and also of iron with vacuum deposited tin film of 5 μm thick into copper vitriol solution. The morphology of synthesized films was analyzed by a scanning electron microscope. The research has shown that the metal films with the thickness of around 1 μm are formed 2 seconds after the reaction start point. The films consist of crystal micro- and nanodendrites. The silver films also contain crystalline plates of silver oxide with characteristic size up to 2 μm . With an increase of reaction time the metal layers are compacted. And minimal pore sizes in this case are 20 nm. The synthesized films can be used for the creation of semiconductor-metal micro- and nanostructures for photocatalytic water splitting. Such films can be also applied in chemical sensors and biosensors for surface enhancement of Raman scattering.

Keywords

morphology, structure, porous film, silver, copper, substitution reaction

Acknowledgements

This work was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 20-19-00559).

SEM characterization were performed using equipment owned by the Federal Joint Research Center “Material Science and Characterization in Advanced Technology” with financial support by Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation: Bezrukov P.A., Nashchekin A.V., Nikonorov N.V., Sidorov A.I. Features of the morphology of micro- and nanoporous copper and silver films synthesized by substitution reaction for photocatalytic application. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 457–462 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-457-462

Введение

Один из перспективных методов использования солнечной энергии — фотокаталитическое расщепление воды для получения водородного топлива. Использование эффективных фотокатодов открывает перспективы практического применения фотокаталитических систем для получения водорода из воды [1–4]. В ряде экспериментальных работ, посвященных изучению свойств микро- и нанопористых металлов, в том числе с полупроводниковым покрытием, показано, что эффективность электронной фотоэмиссии в таких структурах может достигать 50 % [3]. Эффективность фотокаталитического разложения воды определяется не только материалом фотокатода, но и его структурными и морфологическими свойствами, которые в свою очередь, зависят от метода синтеза нанопористого металлического слоя.

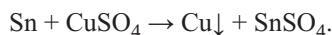
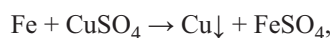
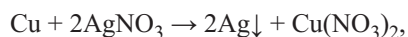
Вторая область применения микро- и нанопористых металлических пленок — это био- и химические сенсоры на основе рамановского рассеяния (Surface Enhanced Raman Scattering, SERS) [5–11]. При распространении поверхностных плазмонов в пористых металлических слоях возникают «горячие точки», в которых происходит увеличение амплитуды поля электромагнитной волны в десятки и сотни раз [12]. Это приводит к увеличению интенсивности рамановского рассеяния и, следовательно, к увеличению чувствительности сенсора [5–11].

Как правило, в перечисленных случаях пористые пленки изготавливают из металлов с высокой проводимостью: Ag, Au, Cu. Существует ряд методов синтеза микро- и нанопористых металлических пленок: химические и вакуумные процессы, электронно-лучевая литография, формирование шаблонов с коллоидными наночастицами, лазерная абляция и др. [1–11, 13–17]. Большинство из этих методов являются многоступенчатыми и требуют дорогостоящего оборудования. Например, метод синтеза нанопористых слоев золота [15] включает в себя шесть этапов: нанесение на подложку слоя сплава серебра и золота; нанесение наносфер из полистирола; плазменное травление в атмосфере кислорода; плазменное травление в атмосфере аргона; удаление полистироловых наносфер; удаление серебра из сплава. Технологический процесс создания слоев из серебряных пористых наносфер состоит из пяти этапов [16]. Многие методы позволяют создавать металлические слои на относительно малых площадях. Например, метод электронной литографии допускает формировать металлические нанопористые слои только в микромасштабах [18].

Цель настоящей работы — изучение возможностей синтеза микро- и нанопористых пленок из серебра и меди с использованием простого и одноступенчатого метода на основе реакции замещения, а также исследование структуры и морфологии синтезированных пленок.

Материалы и методы

Для синтеза пористых пленок из серебра и меди применены следующие реакции замещения:



В качестве подложек для пленок использованы полированные пластины из меди марки М1 и электролитического железа, а также из железа, покрытого слоем олова толщиной 5 мкм. Пленки олова изготовлены методом вакуумного напыления. Достоинства таких подложек в том, что они являются естественной проводящей основой для фотоанода и позволяют создавать фотоаноды с большой площадью поверхности. Пластины имеют размеры 10 × 10 мм и толщину 0,5 мм. Перед проведением синтеза пластины промывались ацетоном в ультразвуковой ванне. Для проведения синтеза пластины из меди погружались в водный раствор азотнокислого серебра марки ЧДА (чистый для анализа) (3,75 г AgNO₃ на 100 мл H₂O), а пластины из железа и железа с оловянным покрытием — в водный раствор медного купороса марки ЧДА (5 г CuSO₄·5H₂O на 100 мл H₂O). Реакции проводились при комнатной температуре без перемешивания раствора. Продолжительность реакций составила от 2 с до 2 мин. Концентрации растворов и продолжительность реакций определены на основании предварительных экспериментов. После проведения реакций образцы промывались дистиллированной водой и высушивались. Исследование структуры и морфологии пленок проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-7001F (JEOL).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны СЭМ-изображения слоев нанопористого серебра на подложках из меди для разной продолжительности реакции. При продолжительности реакции 2 с на подложке формируются фрактальные микродендриты из кристаллического серебра, длина которых достигает 3 мкм (рис. 1, а). Кроме микродендритов формируются кристаллические пластины из серебра, толщиной 100–200 нм с поперечным размером 2 мкм. Состав пластин подтвержден энергодисперсионным анализом. На кристаллическое состояние серебра в пластинах указывает шестиугольная форма пластин.

Таким образом, в процессе реакции замещения происходит самоорганизация серебра в формах кристаллических микродендритов и микропластин. При увеличении продолжительности реакции замещения происходит уплотнение пористого слоя (рис. 1, б). Во время проведения реакции замещения в течение 2 мин толщина пористого слоя составляет 2,91 мкм, минимальный размер пор — 20 нм.

На рис. 2 показано СЭМ-изображение слоя нанопористой меди на подложке из железа. Реакция замещения выполнена в течение 2 с. Сформированы кристаллические фрактальные микродендриты из меди, длина

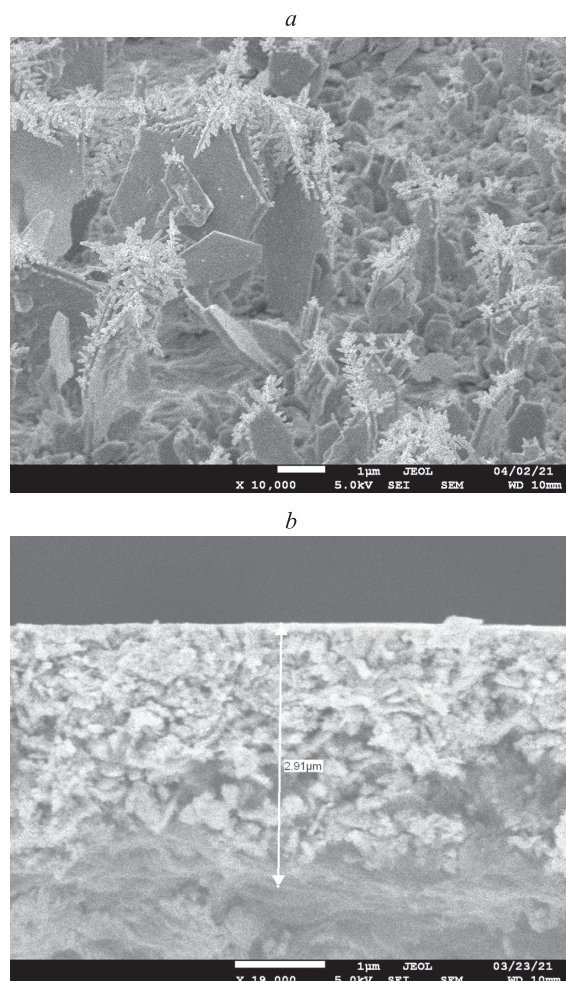


Рис. 1. СЭМ-изображения слоев нанопористого серебра на подложках из меди. Продолжительность реакции: 2 с (а); 2 мин (б). Масштаб 1 мкм. Стрелкой отмечен пористый слой

Fig. 1. SEM-images of layers of nanoporous silver on copper substrates. The duration of the reaction: 2 s (a); 2 min (b). The scale is 1 μm. The arrow indicates the porous layer

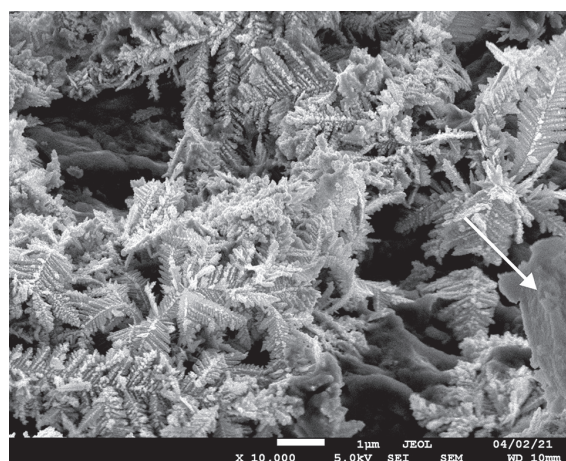


Рис. 2. СЭМ-изображение слоя нанопористой меди на подложке из железа. Продолжительность реакции 2 с. Стрелкой указана пластина из оксида меди. Масштаб 1 мкм

Fig. 2. SEM-images of layer of nanoporous copper on iron substrate. The duration of the reaction is 2 s. The arrow indicates the plate of copper oxide. The scale is 1 μm

которых достигает 3 мкм. На начальной стадии реакции замещения возникают слои из оксида меди черного цвета толщиной 50 нм (справа на рис. 2). Причина возникновения оксида меди — взаимодействие меди с кислородом, растворенным в воде.

Одной из характеристик микродендритов является их фрактальная размерность. Оценим фрактальную размерность микродендрита из меди, показанного на рис. 3. Микродендрит состоит из «ствола» длиной 3 мкм, от которого отходят «ветви» длиной 500–800 нм. На «ветвях» расположены «иголки» длиной до 100 нм, толщина «игол» составляет 15–20 нм. Введем фрактальную размерность для микро- и наномасштабов. Фрактальная размерность D определяется выражением [19]:

$$N = \rho \left(\frac{R}{R_0} \right)^D,$$

где R — радиус кластера; R_0 — радиус мономеров, формирующих кластер; N — число мономеров в кластере; ρ — безразмерный параметр (ρ примерно 1), который можно интерпретировать как плотность фрактального объекта. Оценка показала, что для микромасштаба средняя фрактальная размерность D равна 2,01, а для наномасштаба D — 1,6.

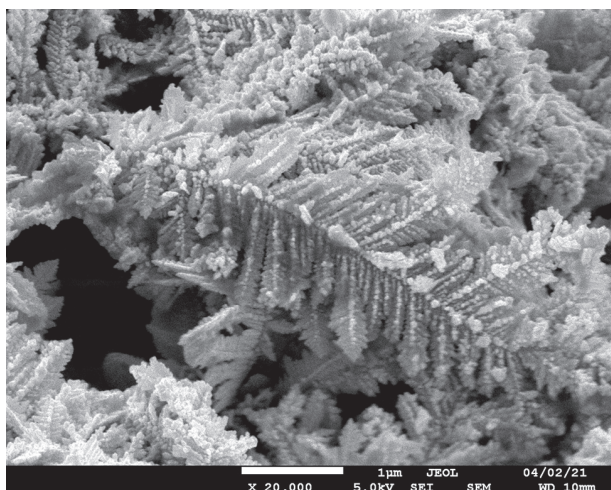


Рис. 3. СЭМ-изображение фрактального микродендрита из меди на подложке из железа. Продолжительность реакции 2 с. Масштаб 1 мкм

Fig. 3. SEM-images of copper fractal microdendrite on iron substrate. The duration of the reaction is 2 s. The scale is 1 μm

На рис. 4 показано СЭМ-изображение слоя нанопористой меди на подложке из железа с оловянным

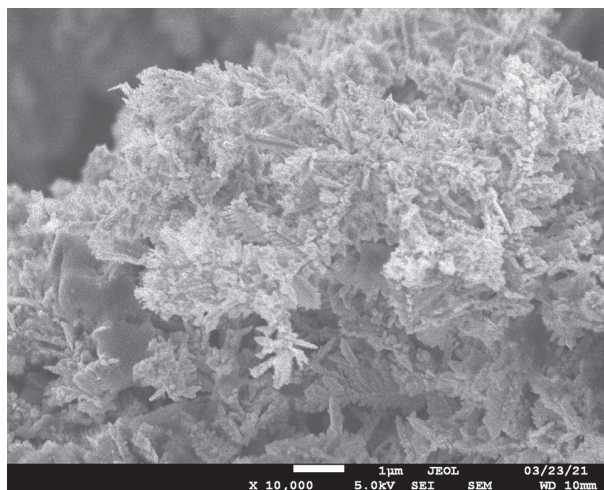


Рис. 4. СЭМ-изображение слоя нанопористой меди на подложке из железа с оловянным покрытием. Продолжительность реакции 2 с. Масштаб 1 мкм

Fig. 4. SEM-images of layer of nanoporous copper on tin substrate. The duration of the reaction is 2 s. The scale is 1 μm

покрытием. В данном случае реакция замещения проходит медленнее, чем в случаях, описанных выше. Причиной является наличие на поверхности олова тонкой оксидной пленки. Рост нанокристаллов меди также происходит в виде микродендритов, однако оксид меди не формируется.

Заключение

Экспериментально показано, что в процессе реакций замещения на металлических подложках могут быть синтезированы микро- и нанопористые пленки из серебра и меди. Пленки состоят из кристаллических фрактальных микродендритов с фрактальной размерностью 2,01 в микромасштабе и 1,6 в наномасштабе. Кроме металлических микродендритов пленки из серебра содержат также пластинчатые кристаллы серебра. При увеличении продолжительности реакции замещения пленки уплотняются, и минимальный размер пор близок к 20 нм. Важным достоинством описанного метода является то, что нанопористые металлические слои могут быть сформированы на подложках больших размеров, причем размер подложки определяется только габаритами ванны, в которой проводится реакция. Полученные результаты могут быть использованы для создания фотокатодов для фотокаталитического разложения воды, а также в био- и химических сенсорах для усиления рамановского рассеяния.

Литература

1. Stolarczyk J.K., Bhattacharyya S., Polavarapu L., Feldmann J. Challenges and prospects in solar water splitting and CO₂ reduction with inorganic and hybrid nanostructures // *ACS Catalysis*. 2018. V. 8. N 4. P. 3602–3635. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00791>
2. Han Z., Qiu F., Eisenberg R., Holland P.L., Krauss T.D. Robust photogeneration of H₂ in water using semiconductor nanocrystals and a nickel catalyst // *Science*. 2012. V. 338. N 6112. P. 1321–1324. <https://doi.org/10.1126/science.1227775>

References

1. Stolarczyk J.K., Bhattacharyya S., Polavarapu L., Feldmann J. Challenges and prospects in solar water splitting and CO₂ reduction with inorganic and hybrid nanostructures. *ACS Catalysis*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 3602–3635. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00791>
2. Han Z., Qiu F., Eisenberg R., Holland P.L., Krauss T.D. Robust photogeneration of H₂ in water using semiconductor nanocrystals and a nickel catalyst. *Science*, 2012, vol. 338, no. 6112, pp. 1321–1324. <https://doi.org/10.1126/science.1227775>

3. Ben-Shahar Y., Scotognella F., Kriegel I., Moretti L., Cerullo G., Rabani E., Banin U. Optimal metal domain size for photocatalysis with hybrid semiconductor-metal nanorods // *Nature Communications*. 2016. V. 7. P. 10413. <https://doi.org/10.1038/ncomms10413>
4. Wu K., Lian T. Quantum confined colloidal nanorod heterostructures for solar-to-fuel conversion // *Chemical Society Reviews*. 2016. V. 45. N 14. P. 3781–3810. <https://doi.org/10.1039/c5cs00472a>
5. Lang X.Y., Chen L.Y., Guan P.F., Fujita T., Chen M.W. Geometric effect on surface enhanced Raman scattering of nanoporous gold: Improving Raman scattering by tailoring ligament and nanopore ratios // *Applied Physics Letters*. 2009. V. 94. N 21. P. 213109. <https://doi.org/10.1063/1.3143628>
6. Jia Y., Ryckman J.D., Ciesielski P.N., Escobar C.A., Jennings G.K., Weiss S.M. Patterned nanoporous gold as an effective SERS template // *Nanotechnology*. 2011. V. 22. N 29. P. 295302. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/29/295302>
7. Qiu H., Zhang Z., Huang X., Qu Y. Dealloying Ag-Al alloy to prepare nanoporous silver as a substrate for surface-enhanced raman scattering: Effects of structural evolution and surface modification // *ChemPhysChem*. 2011. V. 12. N 11. P. 2118–2123. <https://doi.org/10.1002/cphc.201100205>
8. Ma C., Trujillo M.J., Camden J.P. Nanoporous silver film fabricated by oxygen plasma: A facile approach for SERS substrates // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. V. 8. N 36. P. 23978–23984. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b08191>
9. Jiang R., Xu W., Wang Y., Yu S. Tunable porous silver nanostructures for efficient surface-enhanced Raman scattering detection of trace pesticide residues // *New Journal of Chemistry*. 2018. V. 42. N 21. P. 17750–17755. <https://doi.org/10.1039/C8NJ04060E>
10. Pshenova A.S., Sidorov A.I., Antropova T.V., Nashchekin A.V. Luminescence enhancement and SERS by self-assembled plasmonic silver nanostructures in nanoporous glasses // *Plasmonics*. 2019. V. 14. N 1. P. 125–131. <https://doi.org/10.1007/s11468-018-0784-5>
11. Strelchuk V.V., Kolomys O.F., Golichenko B.O., Boyko M.I., Kaganovich E.B., Krishchenko I.M., Kravchenko S.O., Lytvyn O.S., Manoilov E.G., Nasiaka Iu.M. Micro-Raman study of nanocomposite porous films with silver nanoparticles prepared using pulsed laser deposition // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronic*. 2015. V. 18. N 1. P. 46–52. <https://doi.org/10.15407/spqeo18.01.046>
12. Stockman M.I. Electromagnetic theory of SERS // *Topics in Applied Physics*. 2006. V. 103. P. 47–65. https://doi.org/10.1007/3-540-33567-6_3
13. Komissarenko F.E., Mukhin I.S., Golubok A.O., Nikonorov N.V., Prosnikov M.A., Sidorov A.I. Effect of electron beam irradiation on thin metal films on glass surfaces in a submicrometer scale // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*. 2016. V. 15. N 1. P. 013502. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.15.1.013502>
14. Choi S., Dickson R.M., Yu J. Developing luminescent silver nanodots for biological applications // *Chemical Society Reviews*. 2012. V. 41. N 5. P. 1867–1891. <https://doi.org/10.1039/c1cs15226b>
15. Arnob M.M.P., Artur C., Misbah I., Mubeen S., Shih W.C. 10^x-enhanced heterogeneous nanocatalysis on a nanoporous gold disk array with high-density hot spots // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2019. V. 11. N 14. P. 13499–13506. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19914>
16. Shen Z., O'Carroll D.M. Nanoporous silver thin films: multifunctional platforms for influencing chain morphology and optical properties of conjugated polymers // *Advanced Functional Materials*. 2015. V. 25. N 22. P. 3302–3313. <https://doi.org/10.1002/adfm.201500456>
17. Koya A.N., Zhu X., Ohannesian N., Yanik A.A., Alabastri A., Zaccaria R.P., Shih R. K.W.-C., Garoli D. Nanoporous metals: From plasmonic properties to applications in enhanced spectroscopy and photocatalysis // *ACS Nano*. 2021. V. 15. N 4. P. 6038–6060. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10945>
18. Ron R., Haleva E., Salomon A. Nanoporous metallic networks: fabrication, optical properties, and applications // *Advanced Materials*. 2018. V. 30. N 41. P. 1706755. <https://doi.org/10.1002/adma.201706755>
19. Feder J. *Fractals*. New York, Springer Science+Business, 1988. XXVI, 284 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>
3. Ben-Shahar Y., Scotognella F., Kriegel I., Moretti L., Cerullo G., Rabani E., Banin U. Optimal metal domain size for photocatalysis with hybrid semiconductor-metal nanorods. *Nature Communications*, 2016, vol. 7, pp. 10413. <https://doi.org/10.1038/ncomms10413>
4. Wu K., Lian T. Quantum confined colloidal nanorod heterostructures for solar-to-fuel conversion. *Chemical Society Reviews*, 2016, vol. 45, no. 14, pp. 3781–3810. <https://doi.org/10.1039/c5cs00472a>
5. Lang X.Y., Chen L.Y., Guan P.F., Fujita T., Chen M.W. Geometric effect on surface enhanced Raman scattering of nanoporous gold: Improving Raman scattering by tailoring ligament and nanopore ratios. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, no. 21, pp. 213109. <https://doi.org/10.1063/1.3143628>
6. Jia Y., Ryckman J.D., Ciesielski P.N., Escobar C.A., Jennings G.K., Weiss S.M. Patterned nanoporous gold as an effective SERS template. *Nanotechnology*, 2011, vol. 22, no. 29, pp. 295302. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/29/295302>
7. Qiu H., Zhang Z., Huang X., Qu Y. Dealloying Ag-Al alloy to prepare nanoporous silver as a substrate for surface-enhanced raman scattering: Effects of structural evolution and surface modification. *ChemPhysChem*, 2011, vol. 12, no. 11, pp. 2118–2123. <https://doi.org/10.1002/cphc.201100205>
8. Ma C., Trujillo M.J., Camden J.P. Nanoporous silver film fabricated by oxygen plasma: A facile approach for SERS substrates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, vol. 8, no. 36, pp. 23978–23984. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b08191>
9. Jiang R., Xu W., Wang Y., Yu S. Tunable porous silver nanostructures for efficient surface-enhanced Raman scattering detection of trace pesticide residues. *New Journal of Chemistry*, 2018, vol. 42, no. 21, pp. 17750–17755. <https://doi.org/10.1039/C8NJ04060E>
10. Pshenova A.S., Sidorov A.I., Antropova T.V., Nashchekin A.V. Luminescence enhancement and SERS by self-assembled plasmonic silver nanostructures in nanoporous glasses. *Plasmonics*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 125–131. <https://doi.org/10.1007/s11468-018-0784-5>
11. Strelchuk V.V., Kolomys O.F., Golichenko B.O., Boyko M.I., Kaganovich E.B., Krishchenko I.M., Kravchenko S.O., Lytvyn O.S., Manoilov E.G., Nasiaka Iu.M. Micro-Raman study of nanocomposite porous films with silver nanoparticles prepared using pulsed laser deposition. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronic*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 46–52. <https://doi.org/10.15407/spqeo18.01.046>
12. Stockman M.I. Electromagnetic theory of SERS. *Topics in Applied Physics*, 2006, vol. 103, pp. 47–65. https://doi.org/10.1007/3-540-33567-6_3
13. Komissarenko F.E., Mukhin I.S., Golubok A.O., Nikonorov N.V., Prosnikov M.A., Sidorov A.I. Effect of electron beam irradiation on thin metal films on glass surfaces in a submicrometer scale. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 013502. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.15.1.013502>
14. Choi S., Dickson R.M., Yu J. Developing luminescent silver nanodots for biological applications. *Chemical Society Reviews*, 2012, vol. 41, no. 5, pp. 1867–1891. <https://doi.org/10.1039/c1cs15226b>
15. Arnob M.M.P., Artur C., Misbah I., Mubeen S., Shih W.C. 10^x-enhanced heterogeneous nanocatalysis on a nanoporous gold disk array with high-density hot spots. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2019, vol. 11, no. 14, pp. 13499–13506. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19914>
16. Shen Z., O'Carroll D.M. Nanoporous silver thin films: multifunctional platforms for influencing chain morphology and optical properties of conjugated polymers. *Advanced Functional Materials*, 2015, vol. 25, no. 22, pp. 3302–3313. <https://doi.org/10.1002/adfm.201500456>
17. Koya A.N., Zhu X., Ohannesian N., Yanik A.A., Alabastri A., Zaccaria R.P., Shih R. K.W.-C., Garoli D. Nanoporous metals: From plasmonic properties to applications in enhanced spectroscopy and photocatalysis. *ACS Nano*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 6038–6060. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10945>
18. Ron R., Haleva E., Salomon A. Nanoporous metallic networks: fabrication, optical properties, and applications. *Advanced Materials*, 2018, vol. 30, no. 41, pp. 1706755. <https://doi.org/10.1002/adma.201706755>
19. Feder J. *Fractals*. New York, Springer Science+Business, 1988, XXVI, 284 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>

Авторы

Безруков Павел Андреевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0002-5415-8749>, pawqal@yandex.ru

Нашекин Алексей Викторович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 6603372975](http://orcid.org/0000-0002-2542-7364), <http://orcid.org/0000-0002-2542-7364>, nashchekin@mail.ioffe.ru

Никоноров Николай Валентинович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7003772604](http://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <http://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Сидоров Александр Иванович — доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57193232588](http://orcid.org/0000-0001-8730-4389), <http://orcid.org/0000-0001-8730-4389>, sidorov@oi.ifmo.ru

Authors

Pavel A. Bezrukov — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-5415-8749>, pawqal@yandex.ru

Alexey V. Nashchekin — PhD, Senior Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 6603372975](http://orcid.org/0000-0002-2542-7364), <http://orcid.org/0000-0002-2542-7364>, nashchekin@mail.ioffe.ru

Nikolay V. Nikonorov — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7003772604](http://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <http://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Alexander I. Sidorov — D.Sc., Associate Professor, Leading Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57193232588](http://orcid.org/0000-0001-8730-4389), <http://orcid.org/0000-0001-8730-4389>, sidorov@oi.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 29.04.2021

Одобрена после рецензирования 15.05.2021

Принята к печати 23.07.2021

Received 29.04.2021

Approved after reviewing 15.05.2021

Accepted 23.07.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»