



## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 546.3-126:544.2

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11259>

## Строение и состав композита пористого кремния с осажденной медью

А. С. Леньшин<sup>1,2✉</sup>, К. Б. Ким<sup>2</sup>, Б. Л. Агапов<sup>1</sup>, В. М. Кашкаров<sup>1</sup>, А. Н. Лукин<sup>1</sup>, С. И. Нифталиев<sup>2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,  
Университетская площадь, 1, Воронеж 394018, Российская Федерация<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,  
проспект Революции, 19, Воронеж 394036, Российская Федерация

## Аннотация

Пористый кремний является перспективным наноматериалом для оптоэлектроники и сенсорики, так как имеет большую удельную поверхность и фотолюминесценцию в видимом диапазоне. Осаждение на поверхности пористого кремния частиц меди позволит значительно расширить сферу применения полученных нанокompозитов. Выбор меди обусловлен тем, что она имеет низкое удельное электрическое сопротивление и обладает высоким сопротивлением к электромиграции по сравнению с другими металлами. Целью работы является изучение изменения строения и состава пористого кремния после химического осаждения меди.

Пористый кремний получен анодированием пластин монокристаллического кремния КЭФ (100) с удельным сопротивлением 0.2 Ом·см. Для травления пластин кремния использовали раствор HF в изопропиловом спирте с добавлением раствора H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Пористость полученных образцов составляла около 70 %. Образцы пористого кремния погружали в раствор сульфата меди (CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O) на 7 суток. Методами сканирующей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии и ультрамягкой рентгеновской эмиссионной получены данные о морфологии, составе исходного образца и образца с осажденной медью. При химическом осаждении меди на пористом кремнии наблюдается заметное искажение формы пор, а также образование больших полостей внутри пористого слоя, однако в нижней части морфология пор остается такой же, как и в исходном образце. Установлено, что химическое осаждение меди на пористом кремнии приводит к проникновению меди в пористый слой, формированию композитной структуры и препятствует окислению пористого слоя при хранении. Таким образом, показано, что химическое осаждение меди на поверхность пористого кремния приводит к видимым изменениям морфологии и состава поверхности и, как следствие, должно оказывать существенное влияние на каталитические, электрические и оптические свойства материала.

**Ключевые слова:** пористый кремний, композиты, медь, ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия, электронное строение

**Источник финансирования:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-73-0154.

**Для цитирования:** Леньшин А. С., Ким К. Б., Агапов Б. Л., Кашкаров В. М., Лукин А. Н., Нифталиев С. И. Строение и состав композита пористого кремния с осажденной медью. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(3): 359–366. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/000>

**For citation:** Lenshin A. S., Kim K. B., Agapov B. L., Kashkarov V. M., Lukin A. N., Niftaliev S. I. Structure and composition of a composite of porous silicon with deposited copper. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(3): 359–366. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11259>

✉ Леньшин Александр Сергеевич, e-mail: [lenshinas@mail.ru](mailto:lenshinas@mail.ru)

© Леньшин А. С., Ким К. Б., Агапов Б. Л., Кашкаров В. М., Лукин А. Н., Нифталиев С. И., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

В настоящее время значительно увеличивается спрос на наноструктурированные и наноразмерные системы [1–2], которые находят широкое применение в микроэлектронике и оптоэлектронике [3–8], а также в медицине и химии [9–11]. Одним из распространенных наноматериалов, используемых в современной промышленности и науке, является пористый кремний (por-Si) [12–15]. Пористый кремний – это материал, полученный анодированием монокристаллического кремния. В зависимости от свойств исходной кремниевой пластины, а также параметров процесса анодирования por-Si может иметь различную морфологию, оптические и электрофизические характеристики [16–18]. Для получения por-Si применяют различные конфигурации электролитических ячеек [19–21]. В отличие от объемного кремния, пористый кремний демонстрирует ряд особенностей, таких как высокая удельная площадь поверхности, фото- и электролюминесценция, биосовместимость. Благодаря таким уникальным свойствам por-Si может быть успешно применен в оптоэлектронике, используется в микромеханических системах и биомедицине. В последнее время активно проводятся исследования, изучающие осаждение металлов на пористом кремнии, что позволит значительно расширить сферу применения полученного композитного материала [22–25].

Известно, что медь имеет более низкое удельное электрическое сопротивление и обладает более высоким сопротивлением к электромиграции по сравнению с алюминием [26], что может найти применение в электролюминесценции и газовых сенсорах.

В работе [27] пористый кремний с частицами меди, осажденными электрохимическим способом, успешно применяется в качестве фотодетектора. Авторами [28] получены образцы пористого кремния с частицами Cu, у которых на спектре появляются полосы инфракрасной люминесценции с пиками при 660.6 и 802.2 нм. Также por-Si с осажденными частицами меди применяется в качестве сенсоров, показывающих высокую каталитическую активность, воспроизводимость, широкий диапазон исследования, а также стабильность работы [29, 30]. При использовании пористого кремния, легированного частицами меди, в качестве газовых сенсоров для обнаружения фосфина чувствительность улучшается в 5 раз по сравнению с аналогами [31].

Существуют различные способы осаждения меди на пористом кремнии: вакуумное испарение, электроосаждение, химическое и иммерсионное осаждение. Преимуществом химического осаждения меди является глубокое проникновение атомов металла в поры [32]. Кроме того, данный метод отличается простотой и невысокой стоимостью.

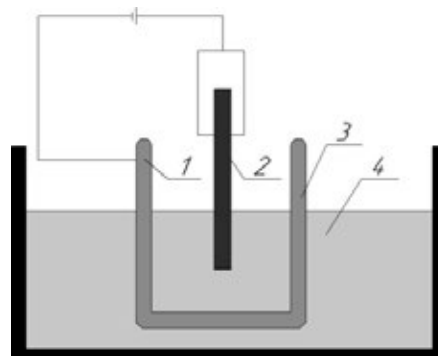
Выбор метода осаждения пленки на пористый кремний во многом определяется требованиями, предъявляемые к получаемому материалу. В свою очередь, механические, химические и физические свойства пленок зависят от микроструктурных характеристик por-Si: размер и распределение пор, текстура и др.

Таким образом, целью работы является изучение изменения строения и состава пористого кремния после химического осаждения меди.

## 2. Экспериментальная часть

Образцы пористого кремния получали из пластин монокристаллического кремния (КЭФ, ориентация 100, удельное сопротивление 0.2 Ом·см) электрохимическим анодированием в электролите на основе плавиковой кислоты [33]. Далее образцы погружали в коллоидный раствор  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ( $C = 0.1$  моль/дм<sup>3</sup>) на 7 суток [34], измеряемое значение pH раствора, при котором происходило осаждение меди, составляет 3–3.5 (температура комнатная; освещенность слабая). Затем образцы промывались в изопропанол и далее хранились в лабораторных условиях в закрытых полиэтиленовых пакетах.

Сравнительный анализ размера пор и толщины пористого слоя исходного образца с осажденной медью проводили методом сканирующей электронной микроскопии (микроскоп JSM-6380LV с приставкой микроанализа).



**Рис. 1.** Схема электрохимического травления образцов пористого кремния: 1 – катод, 2 – анод, 3 – электрод из нержавеющей стали, 4 – раствор электролита

Особенности электронного строения и фазовый состав исходного образца пористого кремния и полученного образца, содержащего металл, определяли методом ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии (USXES). Si  $L_{2,3}$ -спектры образцов пористого кремния были получены на рентгеновском спектрометре-монохроматоре РСМ-500, который позволяет исследовать спектры в диапазоне длин волн 0.5–50 нм. Глубина анализа образцов составляла 20 нм, при энергии электронов 1.5 кэВ, возбуждающих рентгеновское излучение. Моделирование USXES спектров проводилось весовыми коэффициентами с помощью оригинального программного обеспечения. При моделировании Si  $L_{2,3}$ -спектров образцов пор-Si использовались эталонные спектры монокристаллического кремния c-Si, аморфного гидрированного кремния a-Si:H, низкокоординированного кремния  $Si_{1c}$ , субоксида кремния  $SiO_x$  ( $x \sim 1.3$ ) и двуоксида кремния  $SiO_2$  [35–36]. Погрешность моделирования определялась как разница площадей под экспериментальным и смоделированным Si  $L_{2,3}$  спектром и не превышала 10 %. Исследования были проведены спустя две недели после получения образцов.

Для того чтобы получить данные о химических связях и их возможных деформациях на поверхности образцов пор-Si, были проведены исследования с использованием метода ИК-спектроскопии. ИК-спектры пропускания образцов пористого кремния были получены на ИК Фурье спектрометре Vertex 70 (Bruker) с использованием приставки для НПВО. Все исследова-

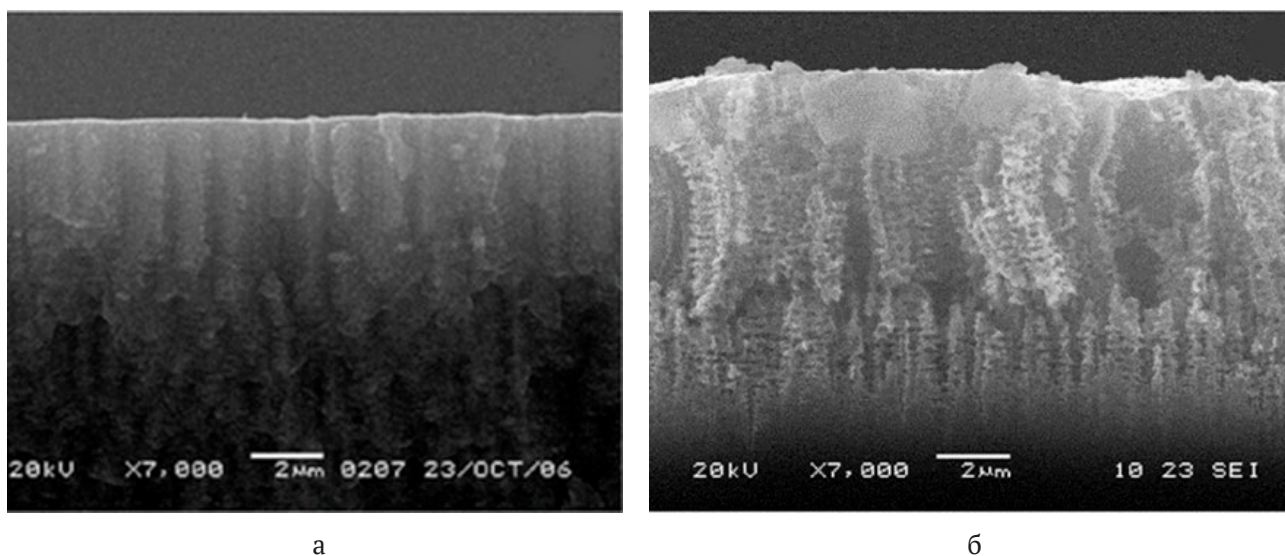
ния были выполнены спустя месяц после получения образцов.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены SEM - изображения сколов исходного пористого кремния и образцов с химически осажденной медью. Средний диаметр пор в пористом кремнии составляет ~100–150 нм, что характерно для пор-Si, полученного по описанной выше методике. Анализ изображений показывает, что при химическом осаждении меди на пористом кремнии наблюдается искажение формы пор. Внутри пористого кремния наблюдается образование полостей высотой до 4-5 мкм, что составляет примерно половину от высоты исходного образца (~10 мкм). В нижней части явных изменений не наблюдается, и сохраняется преимущественная ориентация в направлении, перпендикулярном поверхности (100).

Для подтверждения наличия меди в пористом слое был проведен энергодисперсионный микроанализ сколов образцов (рис. 2), который показал наличие меди ~10 атомных процентов (светлые включения). Похожие результаты были получены ранее при осаждении олова [37]. Зарождение и рост включений меди можно объяснить преимущественно физической адсорбцией на подложку с достаточно высокой площадью удельной поверхностью.

USXES Si  $L_{2,3}$  спектры поверхности образцов представлены на рис. 3. Результаты моделирования с использованием спектров эталонных образцов показали, что образцы пористого



**Рис. 2.** SEM-фотографии скола пористого кремния с включением наночастиц: а – исходный пористый кремний, б – пористый кремний с осажденным Cu (светлые включения)

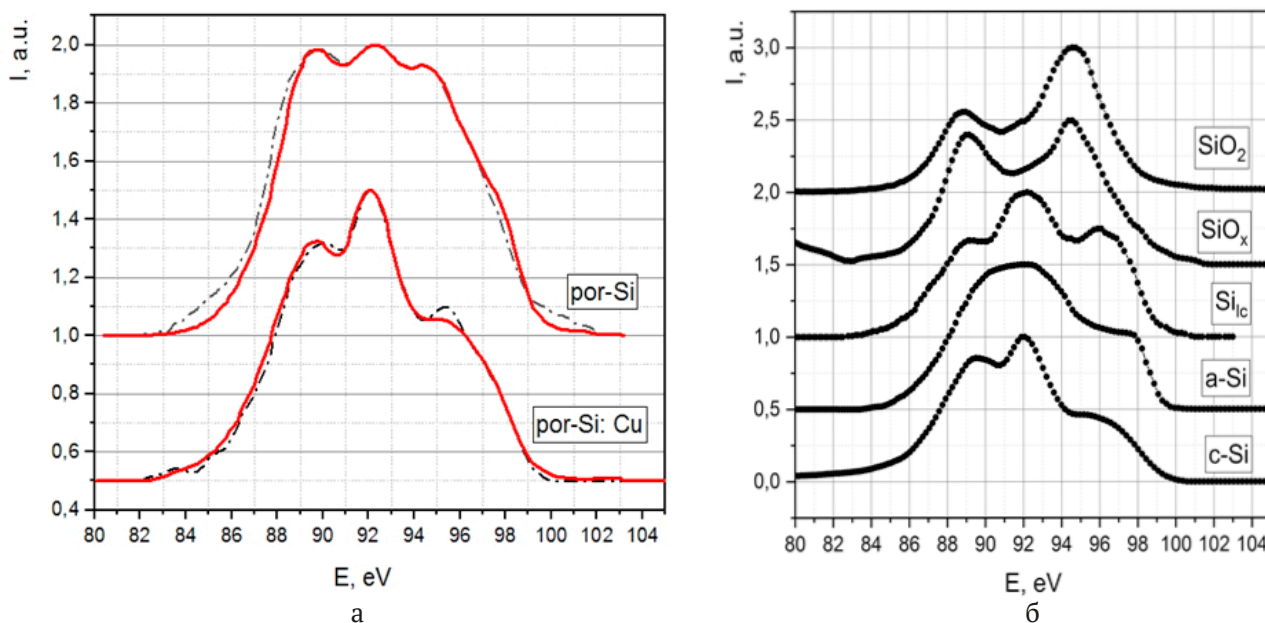


Рис. 3. USXES Si L<sub>2,3</sub> спектры пористого слоя исходного образца и образцов с осажденной медью

кремния с осажденной медью по своему фазовому составу существенно отличаются от исходного образца пористого кремния. В поверхностном слое исходного пористого кремния содержится кристаллический и частично разупорядоченный кремний, аморфный кремний, субоксид и диоксид кремния (табл. 1).

У композитного образца, полученного химическим осаждением меди, наблюдается существенно большее процентное содержание фаз неокисленного кристаллического c-Si и частично разупорядоченного кремния Si<sub>ic</sub> (~95 % против 60 %) при существенно меньшей доле оксидных фаз SiO<sub>x</sub>+SiO<sub>2</sub> (табл. 1). Наиболее вероятно данный факт связан с тем, что при внедрении достаточного большого (до 10 ат. %) количества частиц меди в пористый слой происходит формирование сплошного тонкого слоя на поверхности пор, что в свою очередь в значительной степени препятствует дальнейшему окислению пористого слоя при хранении.

Спектры пропускания образцов пористого кремния и пористого кремния с осажденной медью, полученные методом ИК-спектроскопии с

использованием приставки НПВО, представлены на рис. 4. Несмотря на то, что глубина анализа этой методикой составляет ~1–2 мкм при глубине анализа методом USXES 20 нм, полученные данные достаточно хорошо коррелируют между собой.

На ИК-спектрах пропускания образцов пористого кремния после 30-дневного хранения на атмосфере в лабораторных условиях выдержки присутствуют характерные для данного материала особенности (табл. 2) [38, 39]. Анализ спектра por-Si позволяет сделать вывод о наличии основной полосы пропускания, соответствующей колебаниям Si–Si (616 см<sup>-1</sup>) и различным конфигурациям связей Si–H<sub>x</sub> (625, 2084, 2200 см<sup>-1</sup>), и связей типа O<sub>x</sub>–SiH<sub>y</sub> (865 см<sup>-1</sup>) и O<sub>3</sub>–SiH (900 см<sup>-1</sup>). В диапазоне волновых чисел 2500–4500 см<sup>-1</sup> особенностей на спектрах образцов практически не наблюдалось. Полосы поглощения в области 2360 см<sup>-1</sup> соответствуют адсорбированному CO<sub>2</sub>.

ИК-спектр образца с осажденной медью в целом похож на спектр подложки исходного кристаллического кремния (рис. 4) и демонстрирует гораздо менее выраженные особенности в тех

Таблица 1. «Фазовый» состав образцов исходного пористого кремния и образцов с и образцов с химически осажденной медью

20 нм	«Фазы», %					Порп., %
	nc-Si	Si <sub>ic</sub>	a-Si:H	SiO <sub>x</sub>	SiO <sub>2</sub>	
пор-Si, 20 нм	19	5	35	28	13	5
пор-Si: Cu, 20 нм	80	13	–	–	7	5



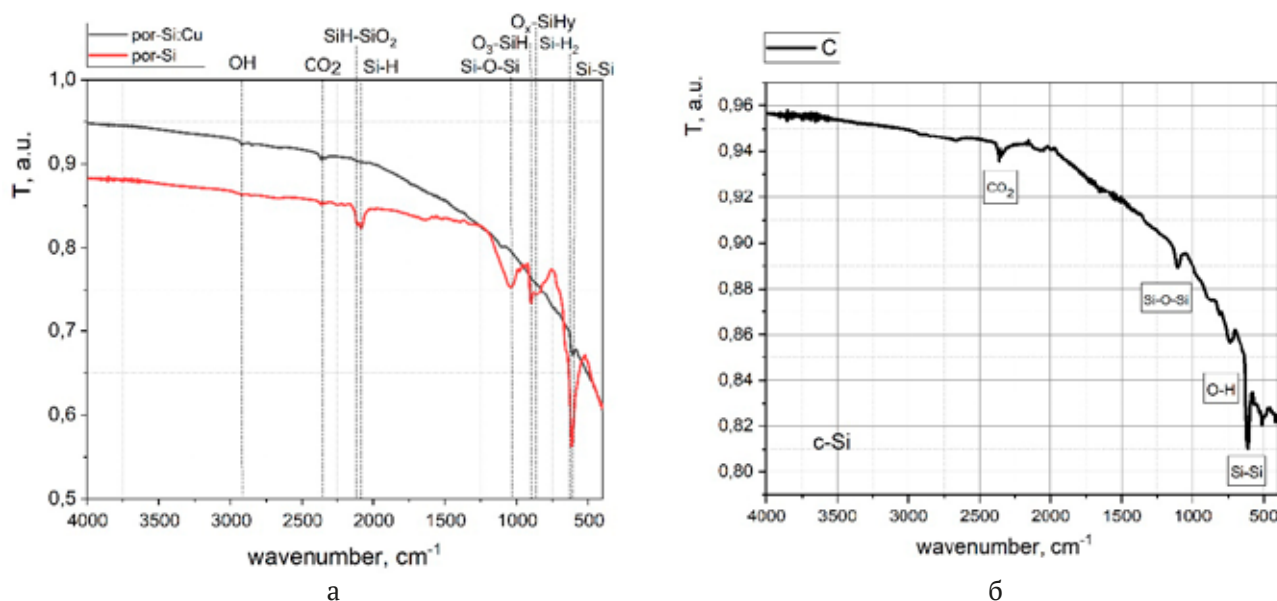


Рис. 4. ИК-спектры пористого кремния и por-Si с осажденной медью (а), а также спектры эталонов (б)

же областях, что у исходного пористого кремния. Практически отсутствует полоса поглощения, соответствующая связям Si-O-Si, и полосы, характерные для связей типа Si-H<sub>x</sub>, O<sub>y</sub>-Si-H<sub>y</sub>. Следует отметить, что в пористом кремнии связи типа Si-H<sub>x</sub>, O<sub>y</sub>-Si-H<sub>y</sub> при хранении образцов активно участвуют в процессах окисления, замещаясь на связи типа Si-O-Si, и приводят к изменению и деградации различных функциональных характеристик этих структур [40].

При изучении кинетики сорбции пористого кремния на воздухе отмечается, что через 30 дней наблюдалось его окисление [41]. В случае же пористого кремния с осажденной медью таких изменений не происходит. Поэтому их отсутствие после 30 дней выдержки образцов на атмосфере может свидетельствовать о существенной стабилизации состава и свойств поверхности композита при предполагаемом дальнейшем изменении функциональных характеристик исходного пористого кремния в процессе естественного старения. Предполагаемый механизм замедления процессов окисления пористого кремния состоит в том, что при взаимодействии с атмосферой медь препятствует проникновению кислорода в пористый слой и окисляется в первую очередь.

#### 4. Заключение

В рамках данного исследования была отработана методика химического осаждения меди в пористый кремний из водного раствора сульфата меди. Полученные результаты показали, что при использовании химического осажде-

Таблица 2. Полосы ИК-поглощения в пористом кремнии и композите с химически осажденной медью

Волновое число, см <sup>-1</sup>	Por-Si
615	Si-Si вал. сим.
625	Si-H <sub>2</sub> маят.
865	O <sub>x</sub> -SiH <sub>y</sub> деформ., SiF
900	O <sub>3</sub> -SiH деформ.
1057	Si-O-Si вал. ТО
2084	Si-H вал. прод.
2200	SiH-SiO <sub>2</sub> струк.
2360	CO <sub>2</sub>

ния медь достаточно хорошо проникает в поры и замедляет процесс окисления пористого слоя при длительном хранении на атмосфере. Таким образом, отработанная в рамках исследования методика может успешно применяться для создания композитных материалов с улучшенными свойствами.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

**Список литературы**

1. Willander M., Nur O., Lozovik Yu E., ... Klason P. Solid and soft nanostructured materials: Fundamentals and applications. *Microelectronics Journal*. 2005;36(11): 940–949. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2005.04.020>
2. Ilyas N., Wang J., Li C., ... Li W. Nanostructured materials and architectures for advanced optoelectronic synaptic devices. *Advanced Functional Materials*. 2022;3(2110976): 1–29. <https://doi.org/10.1002/adfm.202110976>
3. Ammar A. H., Farag A. A. M., Gouda M. A., Roushdy N. Performance of novel nanostructured thin films of 2-cyano-N-(9,10-dioxo-9,10-dihydro-anthracene-2-yl)-2-(2-phenylhydrazono)acetamide: Synthesis and optoelectronic characteristics. *Optik*. 2021;226(2): 165967–166009. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165967>
4. Sicchieri N. B., Chiquito A. J., Gouveia R. C. Electronic and optoelectronic properties of intrinsic and cooper-doped germanium nanowire network devices. *Materials Today: Proceedings*. 2022;51(5):1872–1877. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.081>
5. Zhang S., Wei S., Liu Z., ... Zhang H. The rise of AI optoelectronic sensors: From nanomaterial synthesis, device design to practical application. *Materials Today Physics*. 2022;27 (100812): 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100812>
6. Zhao J.-H., Li X.-B., Chen Q.-D., Chen Z.-G., Sun H.-B. Ultrafast laser-induced black silicon, from micro-nanostructuring, infrared absorption mechanism, to high performance detecting devices. *Materials Today Nano*. 2020;11: 100078–100098. <https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2020.100078>
7. Ni Z., Zhou Sh., Zhao Sh., Peng W., Yang D., Pi X. Silicon nanocrystals: unfading silicon materials for optoelectronics. *Materials Science and Engineering R*. 2019;138: 85–117. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2019.06.001>
8. Xu C., Ravi Anusuyadevi P., Aymonier C., Luque R., Marre S. Nanostructured materials for photocatalysis. *Chemical Society Reviews*. 2019;48: 3868–3902. <https://doi.org/10.1039/C9CS00102F>
9. Jesionowski T., Kuznowicz M., Jędrzak A., Rębiś T. Sensing materials: biopolymeric nanostructures. *Encyclopedia of Sensors and Biosensors*. 2023;2: 286–304. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822548-6.00015-7>
10. Kumar V., Minocha N., Garg V., Dureja H. Nanostructured materials used in drug delivery. *Materials Today: Proceedings*. 2022;69(2): 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.306>
11. Truong V. K., Kobaisi M. A., Vasilev K., Cozzolino D., Chapman J. Current perspectives for engineering antimicrobial nanostructured materials. *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 2022;23: 100399. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2022.100399>
12. Khinevich N., Bandarenka H., Zavatski S., Girel K., Tamulevičienė A., Tamulevičius T., Tamulevičius S. Porous silicon - a versatile platform for mass-production of ultrasensitive SERS-active substrates. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021;323: 111204. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111204>
13. Alhmoud H., Brodoceanu D., Elnathan R., Kraus T., Voelcker N. H. Reprint of: A MACEing silicon: towards single-step etching of defined porous nanostructures for biomedicine. *Progress in Materials Science*. 2021;120: 100817, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100817>
14. Alhmoud H., Brodoceanu D., Elnathan R., Kraus T., Voelcker N. H. A MACEing silicon: towards single-step etching of defined porous nanostructures for biomedicine. *Progress in Materials Science*. 2021;116: 100636. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100636>
15. Pan M., Yang J., Liu K., ... Wang S. Noble metal nanostructured materials for chemical and biosensing systems. *Nanomaterials*. 2020;10(2): 209. <https://doi.org/10.3390/nano10020209>
16. Saini A., Abdelhameed M., Rani D., ... Dutta M. Fabrication of periodic, flexible and porous silicon microwire arrays with controlled diameter and spacing: Effects on optical properties. *Optical Materials*. 2022;134 (A): 113181. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113181>
17. Sun X., Sharma P., Parish G., Keating A. Enabling high-porosity porous silicon as an electronic material. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021;312: 110808. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110808>
18. Aksimentyeva O. I., Tsizh B. R., Monastyrskii L. S., Olenych I. B., Pavlyk M. R. Luminescence in porous silicon – poly(para-phenylene) hybrid nanostructures. *Physics Procedia*. 2015;76: 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.10.006>
19. Goryachev D. N., Belyakov L. V., Yeltsina O. S., Vainshtein J., Sreseli O. M. On the metal-assisted chemical etching of nanoporous silicon. *ECS Meeting Abstracts*. 2012;MA2012-02(26): 2372–2372. <https://doi.org/10.1149/MA2012-02/26/2372>
20. Taurbayev Y. T., Gonchar K. A., Zoteev A. V., Timoshenko V., Zhanabayev Z. Zh., Nikulin V. E., Taurbayev T. I. Electrochemical nanostructuring of semiconductors by capillary-cell method. *Key Engineering Materials*. 2010;442: 1–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.442.1>
21. Spivak Yu. M., Belorus A. O., Somov P. A., Tulenina S. S., Bepalova K. A., Moshnikov V. A. Porous silicon nanoparticles for target drug delivery: structure and morphology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015;643: 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/643/1/012022>

22. Belkacem W., Belhi R., Mliki N. Magneto-optical properties of cobalt nanoparticles in porous silicon. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022;563: 169882. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169882>
23. Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S. Electrochemical deposition of indium into oxidized and unoxidized porous silicon. *Thin Solid Films*. 2021;734: 138860. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138860>
24. Ensafi A. A., Abarghoui M. M., Rezaei B. Electrochemical determination of hydrogen peroxide using copper/porous silicon based non-enzymatic sensor. *Sensors and Actuators B*. 2014;196: 398–405. <https://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2014.02.028>
25. Moshnikov V. A., Gracheva I., Lenshin A. S., Spivak Y. M., Anchkov M. G., Kuznetsov V. V., Olchovik J. M. Porous silicon with embedded metal oxides for gas sensing applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2012;358: 590–595. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.10.017>
26. Save D., Braud F., Torres J., Binder F., Müller C., Weidner J. O., Hasse W. Electromigration resistance of copper interconnects. *Microelectronic Engineering*. 1997;33 (1–4): 75–84. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(96\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(96)00033-0)
27. Al-Jumaili B. E. B., Talib Z. A., Ramizy A., ... Lee H. K. Formation and photoluminescence properties of porous silicon/copper oxide nanocomposites fabricated via electrochemical deposition technique for photodetector application. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 2021,16: 297–310. <https://doi.org/10.15251/DJNB.2021.161.297>
28. Huang Y. M. Photoluminescence of copper-doped porous silicon. *Applied Physics Letters*. 1996;69(19): 2855. <https://doi.org/10.1063/1.117341>
29. Ensafi A. A., Mokhtari Abarghoui M., Rezaei B. A new non-enzymatic glucose sensor based on copper/porous silicon nanocomposite. *Electrochimica Acta*. 2014,123: 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.01.031>
30. Ensafi A. A., Abarghoui M. M., Rezaei B. Electrochemical determination of hydrogen peroxide using copper/porous silicon based non-enzymatic sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014,196: 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.02.028>
31. Ozdemir S., Gole J. L. A phosphine detection matrix using nanostructure modified porous silicon gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2010;151(1): 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.08.016>
32. Darwich W., Garron A., Bockowski P., Santini C., Gaillard F., Haumesser P.-H. Impact of surface chemistry on copper deposition in mesoporous silicon. *Langmuir*. 2016;32(30): 7452–7458. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b00650>
33. Кашкаров В. М., Леньшин А. С., Попов А. Е., Агапов Б. Л., Турищев С. Ю. Состав и строение слоев нанопористого кремния с гальванически осажденным Fe и Co. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2008;72(4): 484–490. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9934166>
34. Canham L. *Handbook of porous silicon*. Springer Cham; 2018., 1613 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6>
35. Мануковский Э. Ю. *Электронная структура, состав и фотолюминесценция пористого кремния*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Воронеж, ВГУ. 1999. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/elektronnaya-struktura-sostav-i-fotoluminescenciya-poristogo-kremniya>
36. Kashkarov V., Nazarikov I., Lenshin A., Terekhov ... Domashevskaya E. Electron structure of porous silicon obtained without the use of HF acid. *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*. 2009;6 (7): 1557–1560. <https://doi.org/10.1002/pssc.200881019>
37. Леньшин А. С., Кашкаров В. М., Домашевская Э. П., Середин П. В., Бельтюков А. Н., Гильмутдинов Ф. З. Состав нанокompозитов из тонких слоев олова на пористом кремнии, сформированных методом магнетронного распыления. *Физика твердого тела*. 2017;59(4): 773–782. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29257193>
38. Terekhov V. A., Kashkarov V. M., Manukovskii E. Yu., Schukarev A. V., Domashevskaya E. P. Determination of the phase composition of surface layers of porous silicon by ultrasoft X-ray spectroscopy and X-ray photoelectronspectroscopy techniques. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2001; 114–116: 895–900. [https://doi.org/10.1016/S0368-2048\(00\)00393-5](https://doi.org/10.1016/S0368-2048(00)00393-5)
39. Леньшин А. С., Кашкаров В. М., Ципенюк В. Н., Середин П. В., Агапов Б. Л., Минаков Д. А., Домашевская Э. П. Оптические свойства пористого кремния, обработанного тетраэтилортосиликате. *Журнал технической физики*. 2013;58(2): 136–140. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20325813>
40. Lenshin A. S., Seredin P. V., Kashkarov V. M., Minakov D. A. Origins of photoluminescence degradation in porous silicon under irradiation and the way of its elimination. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2017;64: 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.03.020>
41. Turishchev S. Yu., Lenshin A. S., Domashevskaya E. P., Kashkarov V. M., Terekhov V. A., Pankov K. N., Khoviv D. A. Evolution of nanoporous silicon phase composition and electron energy structure under natural ageing. *Physica Status Solidi C*. 2009;6(7): 1651–1655. <https://doi.org/10.1002/pssc.200881015>

### Информация об авторах

*Леньшин Александр Сергеевич*, д. ф.-м. н., в. н. с. кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>  
lenshinas@mail.ru

*Ким Ксения Борисовна*, к. х. н., доцент кафедры неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>  
kmkсениya@yandex.ru

*Агапов Борис Львович*, к. т. н., Центр коллективного пользования научным оборудованием, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

b.agapov2010@yandex.ru

*Кашкаров Владимир Михайлович*, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9460-9244>  
kash@phys.vsu.ru

*Лукин Анатолий Николаевич*, к. ф.-м. н., доцент кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6521-8009>  
ckp\_49@mail.ru

*Нифталиев Сабухи Илич-оглы*, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>  
sabukhi@gmail.com

*Поступила в редакцию 28.11.2022; одобрена после рецензирования 25.12.2022; принята к публикации 26.12.2023; опубликована онлайн 25.09.2023.*