

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 535

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11819>**Фотолюминесцентные пористые кремниевые нанонити как контрастные агенты для биовизуализации****М. Г. Шатская¹, Д. А. Назаровская¹, К. А. Гончар¹, Я. В. Ломовская^{1,2}, И. И. Циняйкин¹,
О. А. Шалыгина¹, А. А. Кудрявцев^{1,2,3}, Л. А. Осминкина^{1,3}**¹ФГОУ ВО «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», Физический факультет, Ленинские Горы, 1, 2, Москва 119991, Российская Федерация²ФГБУН «Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук», ул. Институтская, 3, Пущино 142290, Российская Федерация³Институт биологического приборостроения Российской академии наук, ул. Институтская, 7, Пущино 142290, Российская Федерация**Аннотация**

Кремниевые нанонити (КНН) привлекают все больший интерес ввиду их уникальных структурных, оптических свойств и биосовместимости. Наиболее популярным методом сверху-вниз синтеза КНН является металл-стимулированное химическое травление (МСХТ) пластин кристаллического кремния (с-Si). В качестве катализатора в МСХТ обычно используют наночастицы серебра. Однако использование здесь биоинертных наночастиц золота (Au НЧ) может существенно улучшить характеристики КНН для их биомедицинских применений.

В представленной работе массивы КНН получены методом МСХТ, где в качестве катализатора использовали Au НЧ. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показано, что при травлении пластин с-Si с удельным сопротивлением 1–5 мОм·см, получают массивы 50 нм в диаметре пористых нанонитей, состоящих из мелких кремниевых нанокристаллов (нк-Si) и пор. Размер нк-Si рассчитан из спектров комбинационного рассеяния КНН и составляет около 4 нм.

Показано, что вследствие квантово-размерного эффекта в таких пористых КНН возможно возбуждение эффективной фотолюминесценции (ФЛ) с максимумом в красной области спектра. Вместе с тем, КНН характеризуются низкой токсичностью по отношению к раковым клеткам МСF-7, а ФЛ свойства КНН позволяют их использовать в качестве контрастных агентов для биовизуализации.

Ключевые слова: кремниевые нанонити, фотолюминесценция, спектроскопия комбинационного рассеяния, контрастные агенты, биовизуализация

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10062, <https://rscf.ru/project/22-72-10062/> и при поддержке гранта Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» 23-2-2-18-1.

Благодарности: Использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ имени М. В. Ломоносова.

Для цитирования: Шатская М. Г., Назаровская Д. А., Гончар К. А., Ломовская Я. В., Циняйкин И. И., Шалыгина О. А., Кудрявцев А. А., Осминкина Л. А. Фотолюминесцентные пористые кремниевые нанонити как контрастные агенты для биовизуализации. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 161–167. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11819>

For citation: Shatskaia M. G., Nazarovskaia D. A., Gonchar K. A., Lomovskaya Ya. V., Tsiniiaikin I. I., Shalygina O. A., Kudryavtsev A. A., Osminkina L. A. Photoluminescent porous silicon nanowires as contrast agents for bioimaging. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 161–167. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11819>

✉ Осминкина Любовь Андреевна, e-mail: osminkina@physics.msu.ru

© Шатская М. Г., Назаровская Д. А., Гончар К. А., Ломовская Я. В., Циняйкин И. И., Шалыгина О. А., Кудрявцев А. А., Осминкина Л. А., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

В настоящее время активно развиваются технологии по разработке и применению наноматериалов в биомедицине, и особое место среди них занимают нанонити и наночастицы кремния. Показано, что наноструктуры кремния могут быть использованы в самых различных областях: от доставки лекарств до тканевой инженерии [1]. Это возможно благодаря таким их уникальным свойствам, как биосовместимость [2, 3], биodeградируемость [4, 5] и фотолюминесценция (ФЛ) в видимой области спектра [6, 7]. ФЛ в данном материале объясняется квантово-размерными эффектами (КРЭ), которые проявляются при уменьшении размеров нанокристаллов кремния (нк-Si) < 10 нм [1, 4]. Именно благодаря ФЛ свойствам пористые наноструктуры кремния имеют большой потенциал в биовизуализации [8–10]. Кроме того, поверхность пористого кремния может быть легко функционализирована силановыми группами, антителами, полимерами и проч., в зависимости от поставленных целей [8, 11, 12].

Существует несколько основных методов получения пористых наноструктур на поверхности подложек кристаллического кремния (с-Si), и наиболее часто используемым является электрохимическое (ЭХ) травление [11, 13]. Результатом ЭХ травления с-Si являются пленки пористого кремния (ПК), представляющие собой губчатую структуру из нк-Si и пор. При этом, меняя параметры подаваемого напряжения, уровень легирования с-Si и концентрации растворов используемых электролитов можно получать макро-, мезо- и микропористые пленки с размером пор 1–5, 5–50 и 50–100 нм соответственно [14]. Метод ЭХ травления является достаточно простым и легко масштабируемым, тем не менее чаще всего используемые в биомедицинских целях пленки мезопористого кремния не обладают достаточными ФЛ свойствами для визуализации биообъектов. Причиной этому являются слишком большие размеры содержащихся в них нк-Si, далекие для условий возникновения КРЭ. Поэтому для разгортывания ФЛ пленки ПК или полученные из них наночастицы окисляют, тем самым уменьшая размер нк-Si, выдерживая образцы в воде, тетраборате натрия или подбирая условия их сушки [8, 15, 16].

Металл-стимулированное химическое травление (МСХТ) подложек с-Si является также распространенным методом получения наноструктур кремния [17]. В качестве катализатора в МСХТ обычно используют наночастицы серебра [18–

20]. Результатом МСХТ являются массивы 20–100 нм в диаметре кремниевых нанонитей (КНН) на поверхности с-Si. Показано, что пористость КНН зависит от уровня легирования с-Si: при травлении низколегированных подложек получают непористые КНН, в то время как травление высоколегированных подложек приводит к синтезу пористых КНН [18, 19, 21]. При этом пористые КНН сразу после их получения характеризуются мезопористой структурой и эффективной стабильной ФЛ, что несомненно облегчает изготовление образцов для потенциального применения в тераностике заболеваний [22]. Следует, однако, отметить фактическое отсутствие работ, где бы исследовали ФЛ КНН, синтезированных МСХТ с участием наночастиц золота (Au НЧ). Отметим также, что использование биоинертных Au НЧ может существенно улучшить характеристики КНН для их биомедицинских применений.

Целью представленной работы является получение и исследование морфологии и ФЛ свойств пористых КНН, синтезированных с использованием Au НЧ в качестве катализаторов МСХТ, для их использования в качестве контрастных агентов для биовизуализации живых клеток.

2. Методика эксперимента

Пористые КНН синтезировали методом МСХТ подложек с-Si (100) с удельным сопротивлением 1–5 МОм·см. На предварительном этапе с-Si промывали в ацетоне и изопропанол в ультразвуковой ванне (Elmasonic US bath 37 КГц) в течение 5 мин, затем промывали деионизованной водой (Millipore) и высушивали на воздухе. Для удаления оксидного слоя подложку с-Si выдерживали 2–5 мин в 5 М HF, затем снова промывали водой и высушивали. Наночастицы золота восстанавливали на поверхности с-Si из водного раствора 0.01 М AuCl₃, смешанного с 5 М HF в пропорции 1:1 в течение 15 секунд. Травление кремния происходило в растворе 5М HF с 30%-ной H₂O₂ (10:1) в течение 60 мин, процесс останавливается перемещением пластин в воду. Далее наноструктурированные пластины высушивали при комнатной температуре на воздухе. Удаление Au NPs проводили погружением наноструктурированных пластин в царскую водку на 3 минуты.

Для исследования морфологии полученных КНН использовали сканирующий электронный микроскоп Carl Zeiss ULTRA 55 FE-SEM. Для измерения спектров ФЛ или комбинационного (рамановского) рассеяния света (КР) КНН механически отделяли от подложки с-Si и помеща-

ли на металлическую пластину. Спектры КР измеряли с помощью конфокального микроскопа Confotec™ MR350 с лазерным возбуждением на 633 нм и слабой мощностью 1 мВт для защиты образцов от перегрева. Спектры ФЛ образцов измеряли при возбуждении He-Cd лазером на длине волны 325 нм (мощность 10 мВт, диаметр пятна 1 мм). Сигнал ФЛ регистрировался с помощью решеточного монохроматора (MS750, SOLAR TII), оснащенного ПЗС-матрицей.

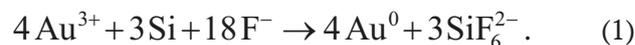
Для исследований цитотоксичности КНН использовали клетки аденокарциномы протоков молочной железы человека MCF-7. Клетки растили в течении 2 суток в культуральном флаконе площадью 25 см² в культуральной среде DMEM с добавлением 5%-ной эмбриональной сыворотки крупного рогатого скота в условиях 37 °С, 5 % CO₂. Для проведения опыта в 96-луночный планшет переносили по 0.1 мл суспензии клеток с начальной концентрацией клеток 10⁵/мл. Затем в лунки добавлялись КНН с различными концентрациями, для чего КНН механически отделяли от подложек c-Si, взвешивали получившийся порошок и помещали его в фосфатный буферный солевой раствор. Для определения количества жизнеспособных клеток после 24-часовой инкубации с КНН проводился тест Alamar Blue: в лунки добавлялся резазурин с концентрацией 0.03 мг/мл. Живые клетки способны окислять краситель до люминесцирующего резорурфина. Интенсивность люминесценции регистрировали с помощью планшетного спектрофлуориметра Infinite F200 (Tecan).

Для биовизуализации клеток с КНН использовали конфокальный люминесцентный микроскоп Leica с масляно-иммерсионным объек-

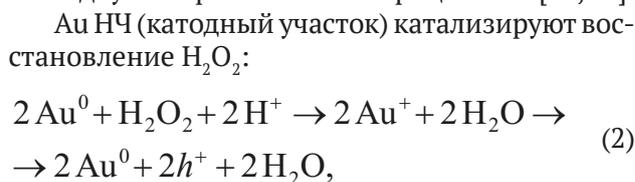
тивом 63/NA 1.40 и возбуждением ФЛ лазером 405 нм. КНН с концентрацией 0.2 мг/мл инкубировали с клетками MCF-7 в течение 9 часов до начала эксперимента. Затем клетки окрашивали, добавляя 3 мг/мл кальцеина-AM (Sigma) для окраски цитоплазмы и 5 мг/мл бисбензида H 33342 (Hoechst, Calbiochem) для окраски ядра.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена схема получения пористых КНН методом золото-стимулированного химического травления (ЗСХТ) высоколегированных пластин c-Si. На первом этапе ЗСХТ проводилось осаждение наночастиц золота (Au НЧ) из раствора 0.01 М хлорида золота (III) и 5 М HF, который в воде диссоциирует на отдельные катионы и анионы и участвует в процессе электрохимического восстановления ионов Au³⁺ до металлического состояния на подложках c-Si [23]:



На втором этапе ЗСХТ химическое травление подложки c-Si, покрытой Au НЧ, происходит в растворе 5 М HF и 30%-ной H₂O₂ в соответствии с двумя параллельными процессами [18, 24]:



инжектированные дырки окисляют Si (анодный участок) до SiO₂:



происходит вытравливание слоя SiO₂ плавиковой кислотой:

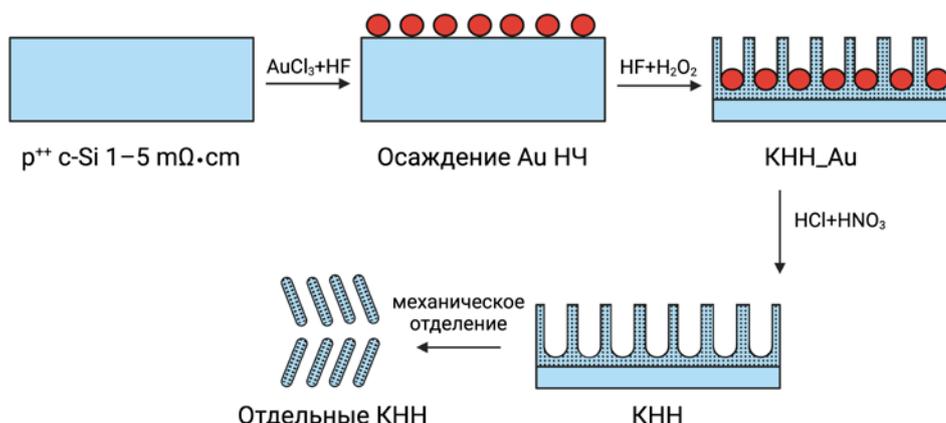
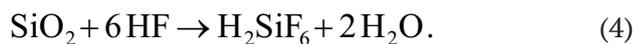


Рис. 1. Схема получения пористых КНН методом золото-стимулированного химического травления высоколегированных пластин c-Si



В результате представленных окислительно-восстановительных реакций, катализатором которых являются Au НЧ, поверхность с-Si протравливается, а оставшиеся непротравленные участки имеют нитевидную морфологию. Отдельные КНН получали их механическим отделением от подложки с-Si с помощью пинцета.

На рис. 2а представлена микрофотография СЭМ поперечного скола пористых КНН на с-Si после 60 минут ЗСХТ. КНН выглядят как квазиупорядоченные массивы с предпочтительной ориентацией вдоль кристаллографического направления [100].

Толщина слоя КНН составляет 20 мкм. Верхушки КНН слипаются при их высушивании из-за капиллярных сил. Порообразование КНН катализируется наночастицами Au в травящем растворе [18]. При этом на увеличенном изображении (рис. 2а) видно, что средний диаметр нанонитей составляет 50 нм, а сами КНН состоят из мелких нанокристаллов и пор. Микрофотография отдельных пористых КНН после их механического отделения от подложки с-Si представлены на рис. 2б. В процессе отделения нанонити могут ломаться, средняя длина отдельных КНН составляет 8 мкм.

На рис. 3 представлен спектр КР полученных отдельных пористых КНН. Здесь наблюдается характерная для нанокристаллического кремния линия рассеяния с положением максимума, сдвинутого на величину $\Delta\omega$ относительно 520.5 см^{-1} , соответствующей продольным колебаниям оп-

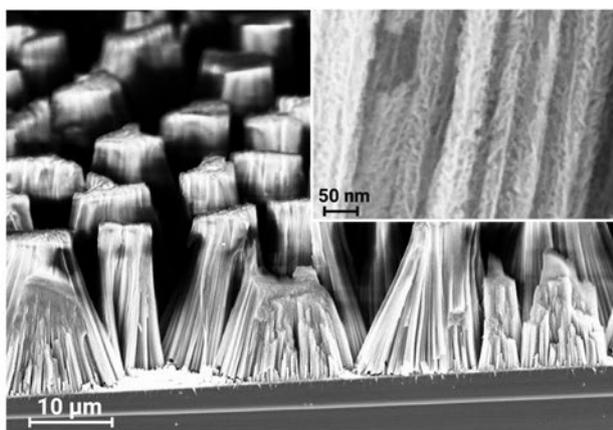
тических фононов в с-Si (показано штрихованной линией). Такой низкочастотный сдвиг КР происходит из-за квантового ограничения фононов, возникающего в содержащихся в пористых КНН нк-Si малых размеров, диаметр (d_{RS}) которых можно рассчитать по формуле [25, 4]:

$$d_{RS} = 0.543 \left(\frac{52.3}{\Delta\omega} \right)^{0.63}. \quad (5)$$

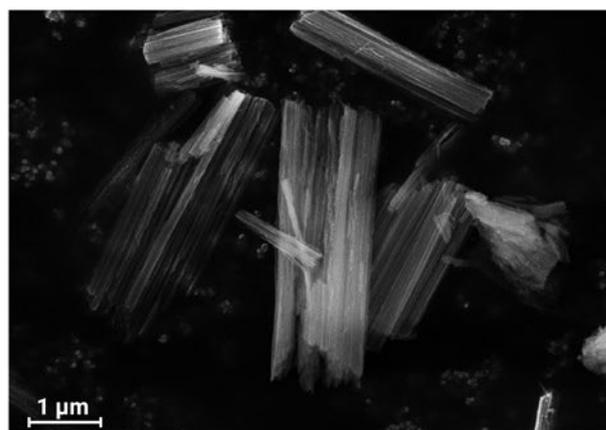
Вычисленные по формуле (5) размеры нк-Si составляют 4.5 нм.

С использованием пакета MagicPlot получена деконволюция спектра КР Лоренцианом и Гауссианом, отвечающим соответственно за кристаллическую и аморфную фазу в нк-Si. Рассчитанный таким образом процент кристаллического кремния в образцах пористых КНН составляет 46.7 %, аморфного 53.3 %.

На рис. 4 показан спектр ФЛ пористых КНН, который представляет собой широкую полосу с максимумом на 755 нм. Такая эффективная ФЛ пористых КНН возможна за счет КРЭ, возникающих в содержащихся в них нк-Si при фотовозбуждении. КРЭ заключается во вторичном квантовании энергии носителей заряда как электронов, так и дырок в квантовой точке – нк-Si, что приводит к увеличению эффективной ширины запрещенной зоны [13]. Эта энергия соответствует энергии излучаемых фотонов фотолюминесцирующими нк-Si таким образом, что положение максимума спектра ФЛ, E_{PL} , связано со средним размером нк-Si (d_{PL}), в соответствии с эмпирической формулой (6):



а



б

Рис. 2. Микрофотографии СЭМ пористых КНН, вид сбоку под углом 38° (а); и отдельных пористых КНН после их отделения от подложки с-Si (б). На вставке к (а) представлен увеличенный фрагмент КНН, демонстрирующий их пористую структуру

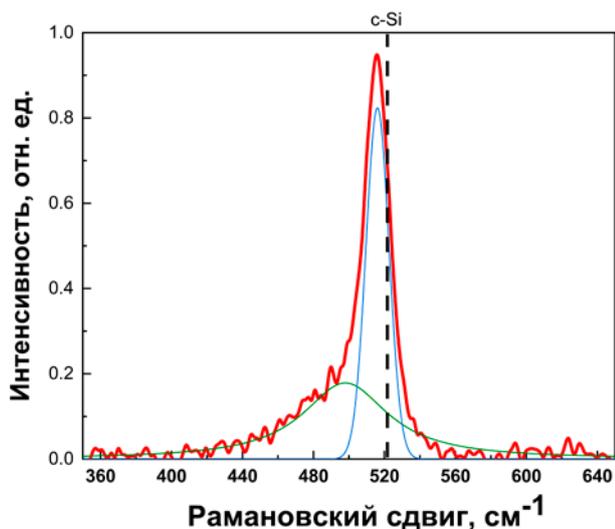


Рис. 3. Спектр КР пористых КНН. Тонкими линиями представлена деконволюция спектра. Штрихованной вертикальной линией показано положение максимума КР c-Si на 520.5 см⁻¹

$$E_{PL} = E_0 + \frac{3.73}{d_{PL}^{1.39}}, \quad (6)$$

где E_0 — ширина запрещенной зоны в c-Si. Отсюда можно получить выражение для вычисления d_{PL} :

$$d_{PL} = \left(\frac{3.73}{\Delta E_g} \right)^{0.72}, \quad (7)$$

где $\Delta E_g = E_{PL} - E_0$. Вычисленные по формуле (7) средние размеры нк-Si составляют 4 нм, что хорошо согласуется с данными КР.

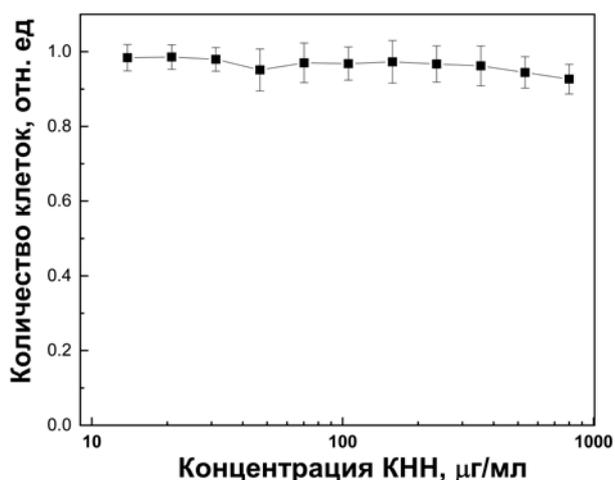


Рис. 5. Цитотоксичность КНН при их инкубации 24 часа с клетками MCF-7. Все точки сняты по отношению к контрольной группе, в которую КНН не добавляли

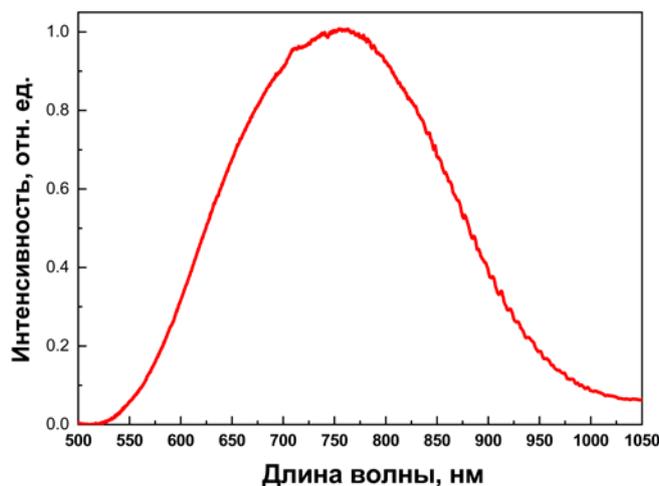


Рис. 4. Спектр ФЛ пористых КНН

На рис. 5 представлены результаты измерения цитотоксичности КНН при их инкубации 24 часа с клетками MCF-7. Все точки сняты по отношению к контрольной группе, в которую КНН не добавляли. Видно, что во всем диапазоне исследуемых концентраций КНН характеризуются отсутствием токсичности, что, несомненно, является хорошим результатом для их будущих применений в биомедицине.

На рис. 6 представлены люминесцентные изображения живых клеток MCF-7 после 9 ч инкубации с пористыми КНН. Люминесценции клеточной мембраны, клеточного ядра и ФЛ КНН.

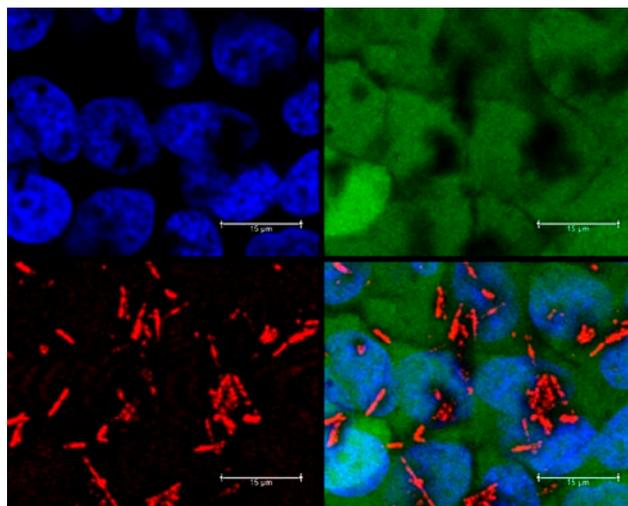


Рис. 6. Люминесцентные изображения живых клеток MCF-7 после 9 ч инкубации с пористыми КНН. Зеленый, синий и красный цвета соответствуют люминесценции клеточной мембраны, клеточного ядра и ФЛ КНН. В правом нижнем углу представлено объединенное изображение клеток с КНН. Размер шкалы 15 мкм

ной мембраны, клеточного ядра и ФЛ КНН отображаются зеленым, синим и красным цветами соответственно. В правом нижнем углу представлено объединенное изображение клеток с КНН. На представленной микрофотографии КНН видны как ФЛ красным нитевидные структуры, которые расположены на мембране и внутри клеток. Таким образом, показано, что низкотоксичные ФЛ КНН можно использовать в качестве контрастных агентов для биовизуализации клеток.

4. Заключение

В работе получены массивы КНН методом ЗСХТ, где в качестве катализатора использовали Au НЧ. Морфология образцов исследована методом сканирующей электронной микроскопии. Показано, что при ЗСХТ травлении пластин с-Si с удельным сопротивлением 1–5 мОм·см получают массивы 50 нм в диаметре пористых нанонитей, состоящих из нк-Si и пор. Размер нк-Si рассчитан из спектров КР КНН и составляет около 4.5 нм. Показано, что вследствие квантово-размерного эффекта в таких пористых КНН возможно возбуждение эффективной ФЛ с максимумом в красной области спектра. При этом размер нк-Si рассчитан из спектров ФЛ КНН и составляет около 4 нм, что находится в хорошем соответствии с данными КР. КНН характеризуются отсутствием токсичности по отношению к раковым клеткам MCF-7 вплоть до концентраций 800 мкг/мл после 24 часов инкубации, а ФЛ свойства КНН позволяют их использовать в качестве контрастных агентов для биовизуализации. Представленные данные открывают новые возможности использования ФЛ КНН для терапии заболеваний.

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. Canham L. (Ed.). *Handbook of porous silicon*. Berlin, Germany: Springer International Publishing; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6>
2. Canham L. T. Nanoscale semiconducting silicon as a nutritional food additive. *Nanotechnology*. 2007;18: 185704. <https://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/18/18/185704>
3. Low S. P., Voelcker N. H., Canham L. T., Williams K. A. The biocompatibility of porous silicon in tissues of the eye. *Biomaterials*. 2009;30: 2873–2880. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.02.008>
4. Гонгальский М. Б., Цурикова У. А., Гончар К. А., Гвинджилия Г. З., Осминкина Л. А. Квантово-размерный эффект в кремниевых нанокристаллах при их растворении в модельных биологических жидкостях. *Физика и техника полупроводников*. 2021;55(1): 43–48. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.01.50386.9517>
5. Maximchik P. V., Tamarov K., Sheval E. V., ... Osminkina L. A. Biodegradable porous silicon nanocontainers as an effective drug carrier for regulation of the tumor cell death pathways. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2019;5(11): 6063–6071. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.9b01292>
6. Delerue C., Allan G., Lannoo M. Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon. *Physical Review B*. 1993;48: 11024. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.11024>
7. Ledoux G., Guillois O., Porterat D., ... Pillard V. Photoluminescence properties of silicon nanocrystals as a function of their size. *Physical Review B*. 2000;62: 15942. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.15942>
8. Park J. H., Gu L., von Maltzahn G., Ruoslahti E., Bhatia S. N., Sailor M. J. Biodegradable luminescent porous silicon nanoparticles for in vivo applications. *Nature Materials*. 2009;8: 331–336. <https://doi.org/10.1038/nmat2398>
9. Tolstik E., Gongalsky M. B., Dierks J., ... Lorenz K. Raman and fluorescence microspectroscopy applied for the monitoring of sunitinib-loaded porous silicon nanocontainers in cardiac cells. *Frontiers in Pharmacology*. 2022;13: 962763. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.962763>
10. Gu L., Hall D. J., Qin Z., ... Sailor M. J. In vivo time-gated fluorescence imaging with biodegradable luminescent porous silicon nanoparticles. *Nature Communications*. 2003;4: 2326. <https://doi.org/10.1038/ncomms3326>
11. Salonen J., Lehto V. P. Fabrication and chemical surface modification of mesoporous silicon for biomedical applications. *Chemical Engineering Journal*. 2008;137: 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.09.001>
12. Gongalsky M. B., Kharin A. Y., Osminkina L. A., ... Chung B. H. Enhanced photoluminescence of porous silicon nanoparticles coated by bioresorbable polymers. *Nanoscale Research Letters*. 2012;7: 1–7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-446>
13. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Applied Physics Letters*. 1990;57: 1046–1048. <https://doi.org/10.1063/1.103561>
14. Lehmann V., Stengl R., Luigart A. On the morphology and the electrochemical formation mechanism of mesoporous silicon. *Materials Science and Engineer-*

ing: B. 2000;69: 11–22. [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(99\)00286-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(99)00286-X)

15. Gongalsky M. B., Kargina J. V., Cruz J. F., ... Sailor M. J. Formation of Si/SiO₂ Luminescent quantum dots from mesoporous silicon by sodium tetraborate/citric acid oxidation treatment. *Frontiers in Chemistry*. 2019;7: 165. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00165>

16. Титова С. С., Осминкина Л. А., Чувенкова О. А., ... Турищев С. Ю. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия биогридных структур клеток ЗТЗ НИИ с интернализированными наночастицами пористого кремния на подложках различных материалов. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(1): 132–138. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/10983>

17. Peng K. Q., Hu J. J., Yan Y. J., ... Zhu J. Fabrication of single-crystalline silicon nanowires by scratching a silicon surface with catalytic metal particles. *Advanced Functional Materials*. 2006;16(3): 387–394. <https://doi.org/10.1002/adfm.200500392>

18. Chiappini C., Liu X., Fakhoury J. R., Ferrari M. Biodegradable porous silicon barcode nanowires with defined geometry. *Advanced Functional Materials*. 2010;20(14): 2231–2239. <https://doi.org/10.1002/adfm.201000360>

19. Турищев С. Ю., Терехов В. А., Нестеров Д. Н., ... Домашевская Э. П. Электронное строение массивов нитевидного кремния, сформированного методом MAWCE. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2016;18(1): 130–141. Режим доступа: <http://journals.vsu.ru/kcmf/article/view/117>

20. Gonchar K. A., Zubairova A. A., Schleusener A., Osminkina L. A., Sivakov V. Optical properties of silicon nanowires fabricated by environment-friendly chemistry. *Nanoscale Research Letters*. 2016;11: 1–5. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1568-5>

21. Tolstik E., Osminkina L. A., Akimov D., ... Popp J. Linear and non-linear optical imaging of cancer cells with silicon nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*. 2016;17(9): 1536. <https://doi.org/10.3390/ijms17091536>

22. Osminkina L. A., Sivakov V. A., Mysov G. A., ... Timoshenko V. Yu. Nanoparticles prepared from porous silicon nanowires for bio-imaging and sonodynamic therapy. *Nanoscale Research Letters*. 2014; 9: 463. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-463>

23. Osminkina L. A., Žukovskaja O., Agafilushkina S. N., ... Sivakov V. Gold nanoflowers grown in a porous Si/SiO₂ matrix: The fabrication process and plasmonic properties. *Applied Surface Science*. 2020;507: 144989. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144989>

24. Akan R., Parfeniukas K., Vogt C., Toprak M. S., Vogt, U. Reaction control of metal-assisted chemical etching for silicon-based zone plate nanostructures. *RSC Advances*. 2018;8(23): 12628–12634. <https://doi.org/10.1039/C8RA01627E>

25. Zi J., Zhang K., Xie X. Comparison of models for Raman spectra of Si nanocrystals. *Physical Review B*. 1997;55(15): 9263. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.9263>

Информация об авторах

Шатская Мария Григорьевна, студент, физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация).

shatskaia.mg19@physics.msu.ru

Назаровская Дарья Андреевна, аспирант, физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8151-9602>

nazarovskaia.da22@physics.msu.ru

Гончар Кирилл Александрович, к. ф.-м. н., н. с., физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2301-2886>

k.a.gonchar@gmail.com

Ломовская Яна Владимировна, аспирант, институт теоретической и экспериментальной биофизики (Пушино, Российская Федерация).

yannalomovskaya@gmail.com

Циняйкин Илья Иванович, аспирант, физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5820-8774>

tcinyaykin@physics.msu.ru

Шалыгина Ольга Александровна, к. ф.-м. н., доцент, физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0067-318X>

shalygina@physics.msu.ru

Кудрявцев Андрей Александрович, к. ф.-м. н., в. н. с., институт теоретической и экспериментальной биофизики, институт Биологического приборостроения РАН (Пушино, Российская Федерация).

centavr42@mail.ru

Осминкина Любовь Андреевна, к. ф.-м. н., в. н. с., физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация), институт Биологического приборостроения РАН (Пушино, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7485-0495>

osminkina@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 19.04.2023; одобрена после рецензирования 28.04.2023; принята к публикации 10.05.2023; опубликована онлайн 25.03.2024.