



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 538.9

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11398>

Локализация молекул белка Dps *E. coli* в нитевидном кремнии при удалении остаточной соли

Е. В. Паринова¹✉, С. С. Антипов^{1,2}, V. Sivakov³, Е. А. Беликов¹, О. А. Чувенкова¹,
Ю. С. Какулия¹, С. Ю. Требунских¹, К. А. Фатеев¹, М. С. Скоробогатов¹, Р. Г. Чумаков¹,
А. М. Лебедев⁴, О. В. Путинцева¹, В. Г. Артюхов¹, С. Ю. Турищев¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

²Институт биофизики клетки Российской академии наук,
ул. Институтская, 3, Пущино 142290, Российская Федерация

³Leibniz Institute of Photonic Technology, Department Functional Interfaces,
Albert Einstein st., 9, Jena 07745, Germany

⁴Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
пл. Академика Курчатова, 1, Москва 123182, Российская Федерация

Аннотация

Работа посвящена удалению остаточных солей в гибридных структурах, сформированных в результате совмещения массивов нитевидного кремния с наноматериалом природного происхождения – бактериальным ферритинподобным белком Dps. Проведено изучение особенностей морфологии и состава поверхности и внутренней части гибридной структуры в результате совмещения и последующей промывки в воде.

Метод жидкофазного металл-ассистированного химического травления применялся для получения нитевидного кремния. Для получения рекомбинантного белка в качестве продуцентов использовались клетки *Escherichia coli* BL21*(DE3) с хроматографической очисткой. Совмещение нитевидного кремния с молекулами белка проводилось путем его наслаивания в лабораторных условиях с последующим высушиванием. Обнаруженная ранее в составе гибридного материала остаточная соль удалялась путем промывки в воде. Полученный гибридный материал изучался методом растровой электронной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Применялась хорошо зарекомендовавшая себя ранее комбинация взаимодополняющих методов растровой электронной микроскопии для изучения морфологии гибридного материала «нитевидный кремний – бактериальный белок Dps» и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии совместно с ионным травлением для изучения состава и физико-химического состояния.

В массивах нитевидного кремния с диаметром нитей около 100 нм и расстоянием между ними от субмикронных до нанометровых размеров обнаружено нахождение белка в результате осаждения и после проведенной обработки в воде. При этом количество остаточной соли NaCl сведено к минимуму на поверхности гибридной структуры и в ее объеме. Полученные данные могут быть использованы при отработке технологии нанесения покрытий развитой поверхности кремниевых нитей доступной для функционализации при контролируемой доставке биогридного материала.

Ключевые слова: наноструктуры, биомолекулы, гибридные материалы, развитая поверхность, рекомбинантный ферритин-подобный белок Dps, нитевидный кремний, растровая электронная микроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

✉ Паринова Елена Владимировна, e-mail: parinova@phys.vsu.ru

© Паринова Е. В., Антипов С. С., Sivakov V., Беликов Е. А., Чувенкова О. А., Какулия Ю. С., Требунских С. Ю., Фатеев К. А., Скоробогатов М. С., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Путинцева О. В., Артюхов В. Г., Турищев С. Ю., 2023



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках научного проекта № 19-72-20180. Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации СП-189.2021.1 для молодых ученых в части формирования массивов нитевидного кремния, методологии работ с молекулами белка из клеточного материала *E. coli*. V. Sivakov благодарит за поддержку Немецкое научно-исследовательское общество (DFG) в рамках гранта SI 1893/18-1.

Для цитирования: Парина Е. В., Антипов С. С., Sivakov V., Беликов Е. А., Чувенкова О. А., Какулия Ю. С., Требунских С. Ю., Фатеев К. А., Скоробогатов М. С., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Путинцева О. В., Артюхов В. Г., Турищев С. Ю. Локализация молекул белка Dps *E. coli* в нитевидном кремнии при удалении остаточной соли. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(3): 454–461. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11398>

For citation: Parinova E. V., Antipov S. S., Sivakov V., Belikov E. A., Chuvenkova O. A., Kakuliya I. S., Trebunskikh S. Yu., Fateev K. A., Skorobogatov M. S., Chumakov R. G., Lebedev A. M., Putintseva O. V., Artyukhov V. G., Turishchev S. Yu. Localization of the *E. coli* Dps protein molecules in a silicon wires under removal of residual salt. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(3): 454–461. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11398>

1. Введение

В современных технологиях все больше ведущих позиций начинают занимать новые функциональные биогибридные материалы, в первую очередь из-за простоты и эффективности их формирования, свойств, зачастую продиктованных самой природой, перспектив применения. Простые способы формирования и удобные, настраиваемые характеристики значительно способствуют созданию эффективных устройств на базе такого рода материалов. Одним из наиболее актуальных и перспективных направлений является формирование, изучение и дальнейшее применение гибридных природоподобных нанобъектов, полученных из различных биокультур [1].

Ярким представителем природного функционального гибридного наноматериала является белок Dps. Белок Dps (ДНК-связывающий белок голодающих клеток) относится к семейству бактериальных ферритинов, функцией которых является накопление запаса железа в организме. Белок Dps содержится практически во всех известных типах живых организмов [2, 3–5]. Молекула белка Dps может представлять собой гибридный нано-биообъект, состоящий из внешней органической оболочки, размер которой составляет около 9 нм, и неорганического ядра, содержащегося во внутренней полости молекулы размером до 5 нм [6, 7]. Белковая часть включает 12 одинаковых субъединиц со структурой гомододекамера [6, 7]. Неорганическое ядро, депонированное во внутренней полости молекулы, представляет собой наночастицу системы железо-кислород [6]. Получаемый из клеточной культуры *Escherichia coli* гибридный наноматериал на основе молекул белка Dps может представлять интерес в качестве потенциального контейнера природного происхождения, спектр использования которого достаточно широк: от накопления и хранения наноматериалов до их адресной доставки.

Ранее нами была показана возможность формирования двумерных структур молекулами ферритина Dps [8], а также получено представление о морфологических особенностях ядер биогибридного наноматериала при использовании метода просвечивающей электронной микроскопии и их составе методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) [9]. Эффективным сочетанием метода РФЭС (с ионным профилированием) и метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) была изучена возможность наполнения молекулами белка Dps (не содержащего неорганических наночастиц) пустот функционального полупроводникового материала с развитой поверхностью – нитевидного кремния (Si-NW) [10, 11]. Однако было установлено значительное остаточное содержание соли NaCl буферного раствора в сформированных структурах нитевидный кремний – белок Dps [11]. В настоящей работе была использована та же комбинация методов РЭМ и РФЭС, дающая информацию о составе, морфологии и физико-химическом состоянии изучаемого объекта для структур нитевидный кремний – белок Dps после удаления остаточного количества соли NaCl в результате промывки водой.

2. Экспериментальная часть

Метод металл-ассистированного жидкофазного химического травления [12, 13] применялся для формирования Si-NW. Были использованы пластины кристаллического кремния *p*- и *n*-типов проводимости ($\sim 1-5 \Omega/\text{см}$ и $< 0.02 \Omega/\text{см}$ соответственно) после промывки в растворе плавиковой кислоты HF (2 %) на протяжении 10 секунд. Далее проводилось осаждение наночастиц серебра на поверхность подготовленных пластин при погружении в раствор AgNO_3 (0.01 М) и HF (5 М). Времена погружения составили 15 с для подложек *p*-типа и 45 с для подложек *n*-типа с

последующим трехминутным травлением в 30 % растворе H_2O_2 и HF (5 М). Наконеч наночастицы серебра в течение 10 минут удалялись промыванием в 65 % водном растворе HNO_3 , после чего структуры высушивались на воздухе. Далее структуры нитевидного кремния использовались идентичные тем, которые изучались в работе [11], как одновременно обработанные части одной и той же пластины.

Клетки бактерий *Escherichia coli* BL21*(DE3), далее *E. coli*, трансформированные pGEM *dps*, использовались в качестве продуцентов для получения рекомбинантного белка Dps. Подробные сведения о получении рекомбинантного белка приведены в работе [6]. Раствор белка имел концентрацию 2 мг/мл в буфере, содержащем 10 мМ NaCl, 50 мМ tris-HCl (pH 7.0) и 0.1 мМ EDTA. После контроля размеров молекул белка методом динамического светорассеяния на поверхность массивов Si-NW производилось однократное наслаивание 10 мкл раствора молекул белка. Далее с целью удаления остаточной соли NaCl [11] проводилось однократное наслаивание 10 мкл воды с последующим ее удалением через 30 сек с использованием фильтровальной бумаги без контакта с поверхностью структуры и высушиванием образца при 37 °С до полного высыхания.

Морфология поверхностей исходного массива Si-NW и гибридной структуры на его основе с наслаенным белком после его промывки исследовались методом растровой электронной микроскопии. Использовался микроскоп Carl Zeiss ULTRA 55 в режиме регистрации вторичных электронов со значением ускоряющего напряжения 2 кВ, что необходимо для работы со структурами биологического происхождения. Для оценки площадей, занимаемых нитевидным массивом и пустотами, а также степени заполнения массивов молекулярной культурой после промывки, использовался программный пакет Image J.

Исследования методом РФЭС производились с использованием анализатора энергий электронов SPECS Phoibos 150 модуля ЭСХА сверхвысоковакуумной экспериментальной станции НАНОФЭС синхротрона «Курчатов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Москва) [14]. Использовалось монохроматизированное Al K α излучение рентгеновской трубки (1486.61 эВ), глубина информативного слоя составила ~ 2–3 нм [15]. Были зарегистрированы обзорные спектры в диапазоне энергий связи 0–850 эВ. Для нормализации и калибровки данных был использован стандартный

подход, основанный на независимой регистрации сигнала чистой золотой фольги (Au 4f). Для идентификации особенностей обзорных спектров использовались известные базы данных, из которых были выбраны актуальные и наиболее точные (монокроматические) спектры [15–17]. Фокусированный источник травления поверхности ионами аргона использовался при ускоряющем напряжении 3 кВ с длительностью травления 20 минут. Площадь участка травления выбиралась с превышением области поверхности, от которой регистрировались данные РФЭС.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены данные исследований, выполненных методом РЭМ, для исходных массивов Si-NW и биогибридных структур. Отметим, что в нашей предыдущей работе [11] мы использовали морфологически идентичные Si-NW. Одновременно сформированные части одной и той же пластины использовались при наслаивании белка [11] и в данной работе, где в последовательность процедур формирования была добавлена промывка полученных биогибридных структур в воде. По этой причине рис. 1а, в содержит данные работы [11] Si-NW подложек *p*- и *n*-типа. В том же масштабе получены РЭМ изображения рис. 1б, г поверхности биогибридных структур после наслаивания молекулярной культуры белка, полученной от бактерий *E. coli* и промывки. Для подложек *p*-типа установлено образование более выраженных нитей с однородным распределением пустот субмикронного размера ~ 200–500 нм между нитями. Для подложек *n*-типа наблюдаются крупные пустоты аналогичного размера совместно со значительно меньшими, размером около 10–100 нм. Сформированные характерные верхние части нитей обозначены стрелкой 1, а пустоты обозначены стрелкой 2 на рис. 1а, в. Показано, что все наблюдаемые пустоты Si-NW доступны для заполнения в результате наслаивания молекул белка Dps, обладающими размером до 10 нм [11].

Напомним, что согласно результатам, полученным ранее, поверхность Si-NW, отличная по своей морфологии для подложек *p*-типа и *n*-типа, практически полностью была покрыта наслаенным белком, и фрагментарно наблюдались лишь самые верхние части нитей. Большие размеры пустот обеспечили относительно большее проникновение биоматериала в нитевидный кремний подложки *n*-типа. Принципиально иная морфология биогибридных структур на-

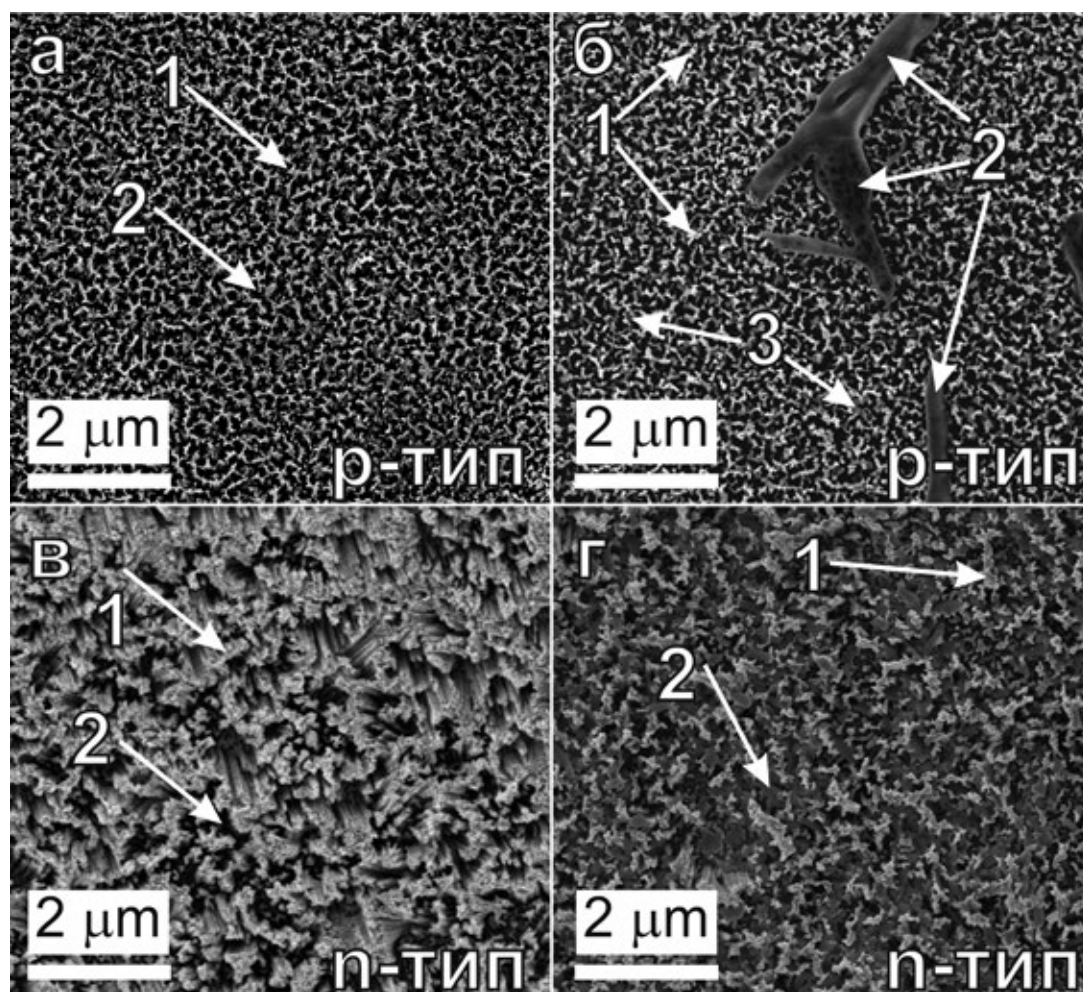


Рис. 1. Растровая электронная микроскопия поверхности исходных образцов массивов нитевидного кремния, сформированных из подложек *p*-типа (а) и *n*-типа (в) [11], а также после наслоения молекулярной культуры белка Dps и промывки в воде (б) и (г), соответственно. 1 – вершины нитей (стенок пустот), 2 (а и в) – пустоты между нитями, 2 и 3 (б и г) элементы белковой культуры

блюдалась в результате промывки с целью удаления остаточной соли NaCl. Согласно данным рис. 1б не зафиксировано наблюдения микрокристаллов соли микронных и субмикронных размеров на поверхности биогибридного материала для Si-NW подложки *p*-типа. Более того, общее количество белка уменьшилось в результате промывки, так как воспроизводимо наблюдаются верхние участки нитей кремния, обозначенные стрелками 1 на рис. 1б. При этом на поверхности нитей кремния наблюдаются крупные островковые образования (рис. 1б, стрелка 2) микронных размеров, существенно превышающие размеры пустот между нитями (размеры пор) и без характерной для соли NaCl огранки в форме. На поверхности этих островковых образований, в свою очередь, отмечаются пустоты с размерами близкими к 100 нм. Это свидетельству-

ет о наличии остаточного количества белка, не попавшего в поры, однако являющегося источником биоматериала, локализованного в массиве Si-NW. Локализация биоконпоненты в порах изученных структур отмечена на рис. 1б стрелками 3. Представляется возможным уверенно говорить о том, что промывка формирующейся биогибридной структуры привела к удалению кристаллов остаточной соли с ее поверхности и наблюдению массива Si-NW с локализованной молекулярной культурой при неполном заполнении пор. Локализация белка в пространствах между нитями Si-NW гораздо лучше заметна для нитевидного кремния подложки *n*-типа на рис. 1г. Стрелкой 1 показана характерная верхняя часть непокрытых белком нитей кремния, а стрелка 2 показывает значительное количество белка в порах массива Si-NW. Степень заполне-

ния пор также уменьшается в результате промывки, по сравнению с данными [11].

Обзорные спектры РФЭС приведены на рис. 2 для массивов нитевидного кремния *p*- и *n*- типа после наложения молекулярной культуры Dps клеток *E. coli* и последующей промывки. Отмечаются все линии, соответствующие биологической компоненте изученных биогибридных структур. Для обоих типов использованных подложек основной является 1s линия кислорода. Существенная интенсивность 1s линии кислорода исключает вклад только от естественного оксида SiO₂, покрывающего нити кремния. Причиной такой высокой интенсивности линии кислорода наряду с наблюдением линий 1s углерода и азота (в порядке уменьшения относительной интенсивности сигнала) является молекулярная культура Dps, локализованная в массиве Si-NW. Также наблюдаются незначительные по интенсивности 2s и 2p линии кремния от непокрытых молекулярной культурой нитей. Наконец следует отметить слабый по относительной интенсивности набор линий хлора (2s и 2p) и натрия (линия 2p и Оже линия KLL). Отметим, что в [11] для биогибридных структур, не подвергнутых удалению остаточной соли NaCl, в ряде случаев сигнал от Оже линии KLL натрия был основным по ин-

тенсивности, как и сигнал от атомов хлора. Таким образом, можно утверждать, что примененный подход к растворению и удалению остаточной соли приводит к практически полному удалению NaCl из состава поверхности изученных биогибридных структур Si-NW – молекулярная культура Dps клеток *E. coli*. Наконец следует отметить общую схожесть в наблюдаемых линиях РФЭС по их энергетическому положению и относительной интенсивности (рис. 2, два нижних спектра). Это говорит о практически одинаковом физико-химическом состоянии поверхности изученных биогибридных структур после наложения молекулярной культуры Dps клеток *E. coli* и последующей промывки вне зависимости от типа подложки и режима ее обработки. То есть локализация биоматериала наблюдается в порах массивов Si-NW для обоих типов морфологии поверхности исходного массива нитей кремния. А процесс промывки позволяет удалять остаточную соль NaCl с поверхности биогибридных структур. В связи с наблюдаемой идентичностью физико-химического состояния поверхности изученных структур мы провели удаление значительной части поверхности за 20 минут травления при относительно высоком напряжении, ускоряющем ионы аргона (3 кВ) только

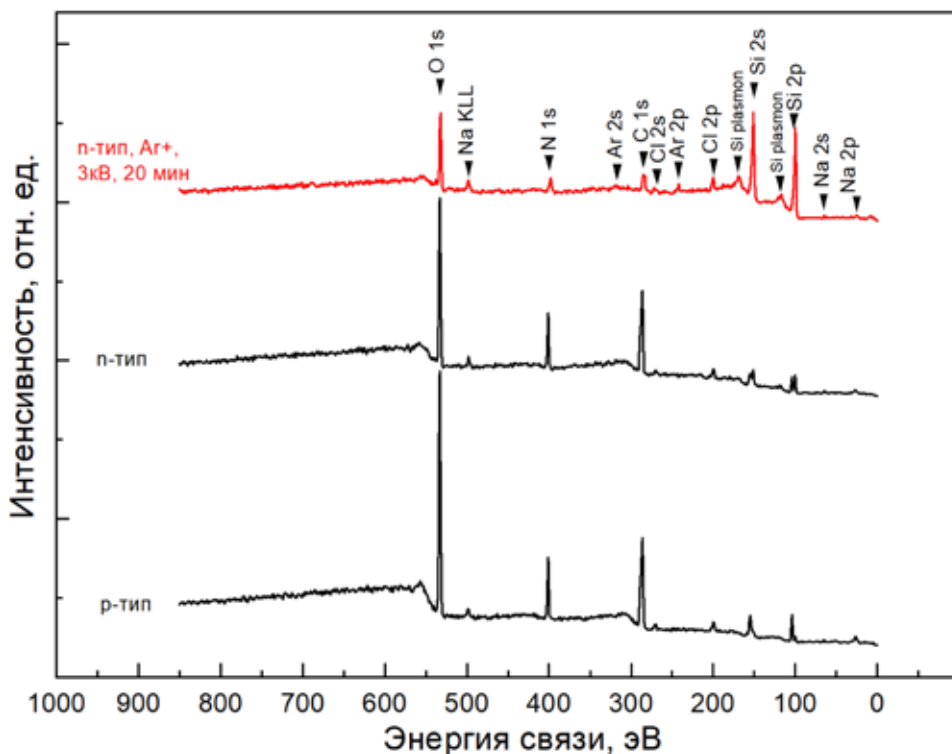


Рис. 2. Обзорные РФЭС спектры образца нитевидного кремния, сформированного на подложке *n*- и *p*-типа до (черным) и после (красным) травления ионным пучком (Ar⁺ 3 кВ 20 мин). Отмечены характерные элементы, составляющие изученную поверхность пробы

для образца биогибридной структуры, сформированной на подложке *n*-типа. Оценка скорости травления при использовании модуля станции НАНОФЭС наряду с калибровочными измерениями показывают скорость удаления для атомов кремния ~ 2.5 нм/мин. Для остаточной части молекулярной культуры эта скорость может отличаться в несколько раз [18]. Удаление таким образом более 50 нм поверхности ионным пучком приводит к значительным изменениям. Существенно понижается относительная интенсивность линии O 1s, что говорит об удалении существенной части локализованной в порах культуры молекул Dps. Одновременно практически ту же интенсивность приобретают линии кремния, как результат значительного отличия в скоростях ионного профилирования биоматериала и неорганического кремниевого «каркаса». Тем не менее линия азота и углерода все еще наблюдаются, подтверждая нахождение молекулярной культуры Dps в глубине пор. В то же время линии остаточной соли не меняют относительной и малой интенсивности. Причиной такого наблюдения является неполное удаление соли NaCl, которая тем не менее равномерно распределяется в объеме биогибридной структуры, вероятно, за счет переосаждения в результате растворения при промывке водой. Наблюдение линий аргона связано с проведением ионного травления (профилирования) поверхности.

4. Выводы

Комбинацией методов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и растровой электронной микроскопии продемонстрирована возможность локализации молекулярной культуры бактериального ферритина Dps клеток *E. coli* в результате эффективного наполнения пустот массивов нитевидного кремния после проведения промывки сформированных биогибридных структур с целью удаления остаточной соли NaCl.

Показано, что морфология исходного массива нитевидного кремния не оказывает существенного влияния на характеристики наполнения пустот молекулярной культурой белка Dps в результате промывок, которые приводят к практически полному удалению остаточной соли.

Таким образом подтверждена возможность функционализации развитой поверхности кремниевых нитей путем управляемого покрытия при контролируемой доставке биогибридного материала.

Комментарий авторов

При подготовке данной работы, которая является продолжением исследований, начатых в [11], установлено, что была допущена техническая неточность. Масштаб изображения исходной поверхности Si-NW, сформированных на подложке *p*-типа, указан неверно на рис. 1а работы [11], где необходимо считать указанный масштаб равным 1 мкм. Однако такой масштаб несколько затрудняет сравнение морфологии с остальными изображениями РЭМ в [11]. По этой причине в данной работе мы приводим изображение того же участка поверхности исходного образца Si-NW из подложек *p*-типа с правильно выбранным масштабом 2 мкм. Неточность не сказывается на понимании обсуждаемых результатов в работе [11]. Авторы приносят свои извинения за допущенную техническую ошибку.

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

- Behrens S. Synthesis of inorganic nanomaterials mediated by protein assemblies. *Journal of Materials Chemistry*. 2008;18: 3788–3798. <https://doi.org/10.1039/B806551A>
- Andrews S. C. Iron storage in bacteria. *Advances in Microbial Physiology*. 1998;40: 281–351. [https://doi.org/10.1016/S0065-2911\(08\)60134-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2911(08)60134-4)
- Harrison P. M., Arosio P. The ferritins: molecular properties, iron storage function and cellular regulation. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*. 1996;1275(3): 161–203. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(96\)00022-9](https://doi.org/10.1016/0005-2728(96)00022-9)
- Massover W. H. Ultrastructure of ferritin and apoferritin: A review. *Micron*. 1993;24(3): 389–437. [https://doi.org/10.1016/0968-4328\(93\)90005-L](https://doi.org/10.1016/0968-4328(93)90005-L)
- Theil E. C. The ferritin family of iron storage proteins. *Advances in enzymology and related areas of molecular biology*. 1990;63: 421–449. <https://doi.org/10.1002/9780470123096.ch7>
- Antipov S., Turishchev S., Purtov Yu., ... Ozoline O. The oligomeric form of the Escherichia coli Dps 3 protein depends on the availability of iron ions. *Molecules*. 2017;22(11): 1904. <https://doi.org/10.3390/molecules22111904>

7. Zhang Y., Fu J., Chee S. Y., Ang E. X., Orner B. P. Rational disruption of the oligomerization of the mini-ferritin *E. coli* DPS through protein–protein interface mutation. *Protein Science*. 2011;20(11): 1907–1917. <https://doi.org/10.1002/pro.731>
8. Antipov S. S., Pichkur E. B., Praslova N. V., ... Turishchev S. Y. High resolution cryogenic transmission electron microscopy study of *Escherichia coli* Dps protein: first direct observation in quasinative state. *Results in Physics*. 2018;11: 926–928. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.10.059>
9. Паринава Е. В., Антипов С. С., Беликов Е. А., ... Турищев С. Ю. Исследования био- наногибридного материала на основе бактериального ферритин-подобного белка Dps методами ПЭМ и РФЭС. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(2): 265–272. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9267>
10. Parinova E. V., Antipov S. S., Belikov E. A., Kakuliia I. S., Trebunskikh S. Y., Turishchev S. Y., Sivakov V. Localization of DPS protein in porous silicon nanowires matrix. *Results in Physics*. 2022;35, 105348. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.105348>
11. Паринава Е. В., Антипов С. С., Сиваков В., ... Турищев С. Ю. Локализация молекул белка Dps *E. coli* в матрице нитевидного кремния по данным растровой электронной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(2): 207–217. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/1110>
12. Sivakov V. A., Brönstrup G., Pecz B., Berger A., Radnoczi G. Z., Krause M., Christiansen S. H. Realization of vertical and zigzag single crystalline silicon nanowire architectures. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2010;114: 3798–3803. <https://doi.org/10.1021/jp909946x>
13. Lo Faro M. J., Leonardi A. A., D'Andrea C., ... Irrera A. Low cost synthesis of silicon nanowires for photonic applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020;31: 34–40. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00672-y>
14. Lebedev A. M., Menshikov K. A., Nazin V. G., Stankevich V. G., Tsetlin M. B., Chumakov R. G. NanoPES photoelectron beamline of the Kurchatov Synchrotron Radiation Source. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021;15(5): 1039–1044. <https://doi.org/10.1134/S1027451021050335>
15. John F. *Moulder handbook of X-ray photoelectron spectroscopy*. Minnesota: Published by Perkin–Elmer Corporation Physical Electronics Division United States of America; 1992. 261 p.
16. *Handbook of the elements and native oxide*. XPS International, Inc.; 1999. 658 p.
17. srdata.nist.gov/xps
18. Hüfner S. (Ed.). Very high resolution photoelectron spectroscopy. In: *Lecture Notes in Physics*. Berlin: Springer; 2007. <https://doi.org/10.1007/3-540-68133-7>

Информация об авторах

Паринава Елена Владимировна, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2817-3547>
parinova@phys.vsu.ru

Антипов Сергей Сергеевич, д. б. н., доцент кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3244-1428>
ss.antipov@gmail.com

Sivakov Vladimir, PhD, руководитель группы, Leibniz Institute of Photonic Technology (Jena, Germany).

<https://orcid.org/0000-0002-3272-501X>
vladimir.sivakov@leibniz-ipht.de

Беликов Евгений Александрович, инженер совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8336-2231>
belikov@phys.vsu.ru

Чуvenкова Ольга Александровна, к. ф.-м. н., с. н. с. совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов», Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5701-6909>
chuvenkova@phys.vsu.ru

Какулия Юлия Сергеевна, ведущий инженер кафедры общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0953-9024>
kakuliia@phys.vsu.ru

Требунских Сергей Юрьевич, к. ф.-м. н., н. с. совместной лаборатории «Атомное и электронное строение функциональных материалов», Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2481-2797>
trebunskikh@phys.vsu.ru

Фатеев Кирилл Александрович, лаборант-физик кафедры общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

fateev@phys.vsu.ru

Скоробогатов Матвей Сергеевич, студент кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9051-8174>

mataska7111@gmail.com

Чумаков Ратибор Григорьевич, к. ф.-м. н., с. н. с. НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-3737-5012>

ratibor.chumakov@gmail.com

Лебедев Алексей Михайлович, к. ф.-м. н., с. н. с. НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9998-8941>

lebedev.alex.m@gmail.com

Путинцева Ольга Васильевна, д. б. н., профессор кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

o.v.putintseva@gmail.com

Артюхов Валерий Григорьевич, д. б. н., профессор, заведующий кафедрой биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5872-8382>

artyukhov@bio.vsu.ru

Турищев Сергей Юрьевич, д. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-3320-1979>

tsu@phys.vsu.ru

Поступила в редакцию 02.12.2022; одобрена после рецензирования 10.12.2022; принята к публикации 15.12.2022; опубликована онлайн 25.09.2023.