

салдары бар, өйткені ол КК жоюға байланысты қоршаған ортаға әсерді азайтады және айналмалы экономика принциптерінің дамуын қолдайды.

Түйін сөздер: көмір күлі, көмір күлін қайта өңдеу, физикалық бөлу, химиялық бөлу, көмір күлін кәдеге жарату.

Information about the authors

Kaster Kamunur – PhD, Senior Researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0013-1926>.

Timur Osserov – PhD, Senior Researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: x_tios_x@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6724-0496>.

Lyazzat Musapirova – PhD, Researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: lyazko@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9881-1324>.

Aisulu Batkal* – PhD student, Researcher, «Institute of Combustion Problems»; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2271-6953>.

Авторлар туралы мәліметтер

Кастер Камунур – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0013-1926>.

Тимур Осеров – PhD доктор, жетекші ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: x_tios_x@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6724-0496>.

Ляззат Мусапирова – PhD доктор, ғылыми қызметкері, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: lyazko@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9881-1324>.

Айсұлу Батқал* – PhD студент, ғылыми қызметкер, ШЖҚ РМК «Жану проблемалары институты»; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2271-6953>.

Сведения об авторах

Кастер Камунур – PhD доктор, ведущий научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: kamunur.k@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0013-1926>.

Тимур Осеров – PhD доктор, ведущий научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: x_tios_x@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6724-0496>.

Ляззат Мусапирова – PhD доктор, научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: lyazko@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9881-1324>.

Айсұлу Батқал* – PhD студент, научный сотрудник, РГП на ПХВ «Институт проблем горения»; e-mail: abatkalova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2271-6953>.

Received 15.03.2024

Revised 10.06.2024

Accepted 11.06.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-52

МРНТИ: 31.15.33



М.А. Бисенова^{2,3*}, А.Г. Умирзаков^{1,2}, К.И. Мить², А.Л. Мереке^{1,2}, Ч.Б. Даулбаев³

¹Satbaev University,

050032, Республика Казахстан, ул. Сатпаева, 22а

²Физико-технический институт,

050032, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Ибрагимова, 11

³Институт ядерной физики,

050032, Республика Казахстан, ул. Ибрагимова 3/1

*e-mail: m-bisenova@list.ru

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОТРУБОК ПЕРОВСКИТА $\text{SrTiO}_3/\text{TiO}_2$ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АНОДИРОВАНИЯ

Аннотация: Слои нанотрубок TiO_2 , сформированных в процессе анодирования, представляют собой область активных исследований в контексте инновационных систем конвертации и накопления энергии. Титановые нанотрубки (TNT) привлекают внимание благодаря своим уникальным свойствам, особенно высокому отношению поверхности к объему, что делает их желанным материалом для различных технологических приложений. Метод анодирования широко используется для производства TNT из-за его простоты и относительной дешевизны, метод

позволяет точно контролировать толщину TiO_2 нанотрубок. Также анодирование может использоваться для создания декоративных и цветных покрытий на титановых нанотрубках. В данном исследовании была создана комбинированная структура, включающая анодные нанотрубки TiO_2 и частицы SrTiO_3 , с использованием химических методов синтеза. Нанотрубки TiO_2 были получены путем анодирования в этиленгликоле, содержащем NH_4F и H_2O , при применении напряжения 30 вольт. Массив анодных нанотрубок, подвергнутый термической обработке при 450 °С, был затем помещен в автоклав, заполненный разбавленным раствором SrTiO_3 . Анализ сканирующей электронной микроскопии (SEM) показал, что TNT характеризуются четкими и открытыми концами трубок. Со средним внешним диаметром 1,01 мкм и внутренним диаметром 69 нм, а их длина составляет 133 нм.

Ключевые слова: Фотокатализатор, TiO_2 , TNT, SrTiO_3 , анодирование.

Введение

Быстрый рост населения мира привел к увеличению спроса на энергию, основную часть которой обеспечивают ископаемые топлива для производства электроэнергии, промышленных нужд и транспорта [1]. Однако, помимо ограниченной доступности, использование ископаемых топлив оказывает негативное воздействие на окружающую среду, создавая побочные продукты, такие как оксиды углерода, азота и серы [2]. В связи с этим возникает острая потребность в разработке экологически более чистых альтернативных источников энергии, которые были бы устойчивыми и оказывали минимальное воздействие на окружающую среду [3]. Водород выделяется как чистый и эффективный источник энергии, и его производство становится важной задачей в области экологически устойчивых источников энергии [4].

Вода представляет собой обильный источник водорода, однако из-за широкого распространения солнечной энергии сложно разделять воду на стехиометрическое количество водорода и кислорода в промышленных масштабах. Тем не менее одним из методов получения водорода является фотокаталитическое расщепление воды. Фотокатализ может эффективно использовать солнечную энергию для расщепления воды на отдельные элементы [5]. Это уникальный и перспективный метод производства водорода, основанный на использовании солнечной энергии для превращения воды в водород и кислород. Этот процесс может стать важным шагом в направлении устойчивых источников энергии, поскольку он объединяет эффективность солнечных панелей и возможность производства чистого водорода. В частности, фотокатализ был продемонстрирован как более эффективная форма очистки сточных вод благодаря впечатляющей эффективности фотокаталитического удаления, быстрому процессу окисления, более низким затратам и отсутствию токсичности [6]. Фотокаталитическое расщепление воды предполагает использование полупроводников в качестве фотокатализатора, и для фотокаталитического расщепления воды было исследовано и разработано множество полупроводников. К ним относятся такие соединения, как TiO_2 , ZnS , CuInS_2 , $\text{g-C}_3\text{N}_4$ а также композиты: TiO_2/CdS , ZnO/CdS , $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}/\text{CdS}$, и наноматериалы: TiO_2 , CdS , $\text{MoS}_2\text{-CdS}$, SrTiO_3 , Au@MoS_2 [7]. Для достижения эффективного фотокаталитического расщепления воды необходим сложный фотокатализатор, способный преодолеть проблемы в процессе окисления воды

Диоксид титана (титан, TiO_2) считается наиболее перспективным и универсальным материалом. За последние десятилетия TiO_2 был всесторонне исследован в различных областях, благодаря своим уникальным свойствам, таким как выдающаяся коррозионная стойкость, высокая биocomпaтибельность, подходящая ширина запрещенной зоны для расщепления воды и стабильные физико-химические характеристики [8] [9]. Узкая запрещенная зона способствует более эффективному сбору солнечной энергии, делая ее идеальным материалом для создания электронно-дырочной пары. Эта пара активно участвует в окислительно-восстановительных реакциях и находит применение в различных областях, таких как красители, продукты питания, биомедицина, фотокатализ, фоторасщепление воды, светочувствительные материалы, сенсibilизированные красителем солнечные элементы и газочувствительные устройства. В последние годы значительные исследовательские усилия были направлены на разработку новых наноматериалов, включая наноструктурированный титан, полученный методами анодирования, золь-гель, гидротермальной обработки и осаждения из паровой фазы [10]. В

настоящее время для разработки и исследования современных устройств, пригодных для различных коммерческих применений, необходимо использовать широкий спектр материалов. Наноматериалы играют ключевую роль в новейших технологиях, обеспечивая создание высокопроизводительных устройств [11]. Работоспособность таких устройств в значительной степени определяется геометрией, формой и морфологией наноструктур [3]. Экспоненциальный рост в литературе указывает на то, что наномасштаб начался в 1990-х годах [12]. Интерес к наномасштабу обусловлен коммерческой доступностью инструментов для манипулирования и измерения характеристик наномасштаба по нескольким причинам: (1) ожидание возникновения новых физических, химических и биологических свойств наноструктур; (2) предположение о том, что наноструктуры предоставят новые строительные блоки для инновационных материалов с уникальными свойствами; (3) миниатюризация полупроводниковой промышленности до наномасштаба; и (4) признание того, что молекулярные механизмы в биологических клетках функционируют на наноуровне. Ожидание того, что наноструктура обеспечивает новые строительные блоки для инновационных новых материалов с новыми свойствами, миниатюризация до наномасштаба [13].

2. Материалы и методы

2.1. Материалы

Фольга Ti (99,9%, толщина 0,1 мм, Китай), этанол (45%), этиленгликоль (99,9%, Россия), фторид аммония и нитрат натрия (70%) были использованы без дополнительной очистки. Во всех экспериментах в качестве растворителя применялась дистиллированная вода.

2.2. Синтез SrTiO_3

SrTiO_3 был получен методом химического осаждения. Для этого 2,54 г $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ были смешаны с 100 мл дистиллированной воды, затем добавили 0,958 г TiO_2 в соотношении Ti и SrTiO_3 1:1 в этот раствор. Далее раствор подвергали обработке в течение 30 минут в ультразвуковой ванне. Постепенно добавляли раствор с поддержанием интенсивного перемешивания, при этом доводили pH смеси до 6–7 с использованием 10% раствора NH_3OH . Суспензию несколько раз промывали дистиллированной водой. Полученный порошок сушили при температуре 60°C в течение 12 часов, а затем прокаливали при температуре 900°C в течение 1 часа.

2.3. Синтез нанотрубок

TiO_2 нанотрубки (TNT) получен методом анодирования. Фольгу Ti толщиной 0,1 мм изначально разрезали на образцы размером 1 см × 6 см и механически полировали наждачной бумагой P150. Затем листы проходили ультразвуковую обработку в нитрате натрия, этаноле и дистиллированной воде для окончательной очистки. Эксперименты по электрохимическому анодированию проводились в двухэлектродной электрохимической ячейке, где титановая фольга служила рабочим электродом, а лист никелевой фольги – противозлектродом, при постоянном потенциале и комнатной температуре ($\approx 22^\circ\text{C}$). На рисунке 1 показана схема процесса формирования титановых нанотрубок.

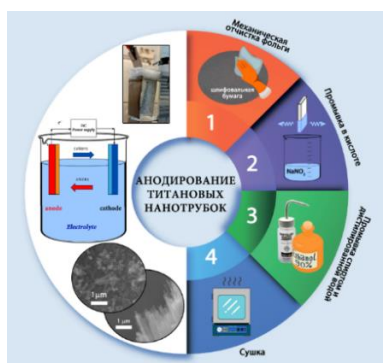


Рисунок 1 – Схематическая иллюстрация этапов по лучению TNT

Использовался источник питания постоянного тока модели UNI-T UTP3315TPL от компании UNI-TREND Technology, Китай. Этот блок применялся в качестве источника напряжения для управления анодированием. Электролит для анодирования состоял из

этиленгликоля с добавлением 0,7 мас. % NH_4F и 3,5 мас.% дистиллированной воды. Процесс анодирования проводился при 30 В в течение 96 часов при комнатной температуре. Анодированные образцы титановых нанотрубок затем помещались в этиленгликоль и подвергались ультразвуковому перемешиванию до тех пор, пока пленка нанотрубок не отделялась от титановой подложки. Суспензия фильтровалась, и остаток несколько раз промывали дистиллированной водой. Полученный порошок сушили при температуре 60 °С в течение 3 часов, а затем прокаливали при температуре 450 °С в течение 1 часа.

2.4. Синтез TNT@SrTiO_3

Для создания комбинированной структуры TNT@SrTiO_3 были взяты порошки 0,2 г TNT и 0,1 г SrTiO_3 , смешанные с 40 мл дистиллированной воды и помещенные в нержавеющий автоклав. Запечатанный автоклав нагревали до 90 °С и выдерживали в течение 6 часов. По завершении эксперимента автоклав охлаждали до комнатной температуры. Затем образцы промывали дистиллированной водой и сушили в печи в течение 5 часов при 60 °С.

2.5. Характеристика

Морфологию TNT и комбинированных TNT@SrTiO_3 анализировали с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6490LA от компании JEOL, Япония. Кристаллическую структуру образцов изучали при помощи рентгеновского дифрактометра Drone-8.

3. Результаты и обсуждение

Среди различных наноструктурированных оксидных материалов особое внимание уделяется нанотрубкам TiO_2 из-за их улучшенных свойств, экономичной конструкции и более высокого отношения поверхности к объему [14]. Титановые нанотрубки (TNT) с высокой удельной поверхностью, способностью к ионному обмену и фотокаталитическими свойствами рассматриваются для различных потенциальных применений и могут быть отличным кандидатом в качестве катализатора в фотокатализе [15].

На рисунке 2 представлены изображения верхних поверхностей образцов анодных нанотрубок TiO_2 до и после осаждения SrTiO_3 на их поверхность.

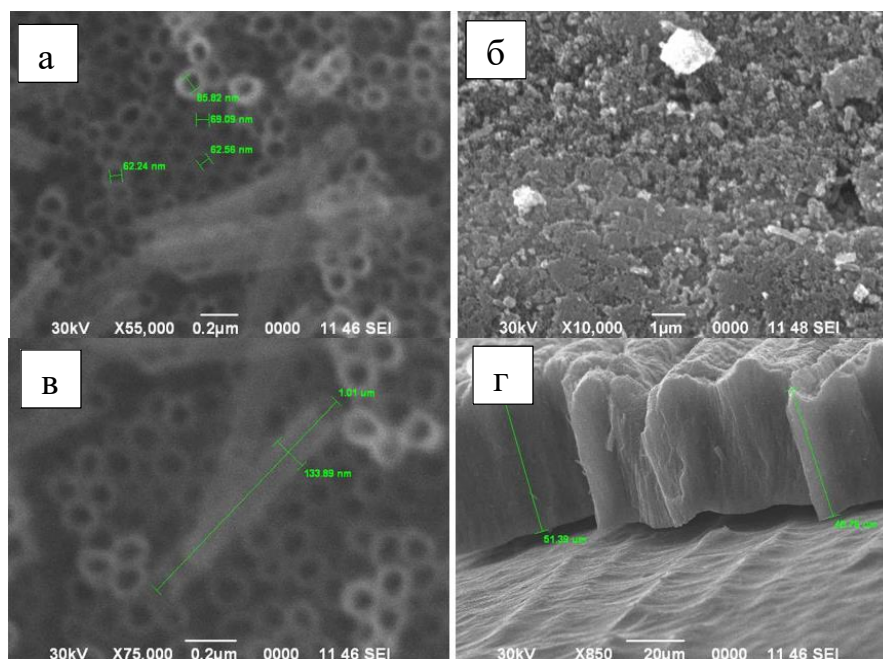


Рисунок 2 – SEM –изображения, показывающие верхнюю поверхность анодного массива TNT– (а); и массива TNT@SrTiO_3 – (б); вид сверху – (в) вид сбоку – (г) образцов при увеличении поверхность анодного массива приготовленного при 30 В

На верхней поверхности анодированных и отожжённых TNT при 450°С, изображенных на рисунке 2 а, видны четко очерченные трубки с открытыми концами, которые образуют гексагональный порядок. Это типично для анодирования, как было ранее отмечено в [16].

После нанесения покрытия SrTiO_3 наблюдаются выраженные морфологические изменения (рисунок 2 б). В течение 6 часов обработки в автоклаве поверхность проявляет тенденцию к покрытию наночастицами и также обнаружено неравномерное осаждение. На поверхности формируются агломераты, при этом все еще видны круглые отверстия, соответствующие TNT. Заметим, что увеличение времени обработки до 6 часов существенно влияет на морфологию поверхности, приводя к образованию более крупных агломератов и блокированию вершук трубок [17].

На рисунке 2 в видно, что исходные TNT имеют средний внешний диаметр 1 мкм, а на рисунке 2 а показан внутренний диаметр 69 нм. Длина трубок составляет 133 нм, как видно на вставке. Вид в поперечном сечении отдельно стоящей мембраны из диоксида титана толщиной более 50 нм в среднем показан на рисунке 2 г, механически разрушенной для визуализации. Анализируя результаты работы с другим автором при одинаковом времени анодирования в 96 часов, были получены нанотрубки длиной 360 мкм из фольги Ti толщиной 0,25 мм, анодированной в растворе, содержащем 0,3 мас.% NH_4F и 2% H_2O в этиленгликоле при 60 В [18]. Наши результаты, полученные при использовании анодирования в растворе с содержанием 0,7 мас.% NH_4F и 3,5 мас.% дистиллированной воды при 30 В, показали длину нанотрубок TNT в наноразмерах – 133 нм. SEM-снимки также демонстрируют, что полученные нанотрубки являются упорядоченными и имеют четкие открытые концы. Несмотря на низкое напряжение (30 В), мы компенсировали это, увеличив концентрации NH_4F и H_2O в анодном растворе. Из-за повышенного массового процента NH_4F компенсация производится увеличением концентрации H_2O , что приводит к более быстрому росту и, следовательно, к большей длине нанотрубок. XRD-анализ образцов TNT@SrTiO_3 проводился на рентгеновском дифрактометре Drone-8 с углами поворота блока детектирования в диапазоне от 20° до 80° и минимальным шагом перемещения блока детектирования 0,001. Характерные пики образцов TNT появляются при 2θ $25,4^\circ$, $37,9^\circ$ и $53,4^\circ$, $71,5^\circ$, что свидетельствует о поликристаллической структуре анатаза и хорошо согласуется со стандартной картой для TNT (карта JCPDS 1286) (Ghani et al., 2019). Особенно важно отметить, что пик при 2θ , равный $71,23^\circ$, обладает высокой интенсивностью, что свидетельствует о высокой кристалличности полупроводника. Это имеет значение, поскольку эффективность переноса заряженных носителей, образующихся при фотогенерации, может сильно зависеть от кристалличности материала. Низкая кристалличность может привести к неэффективной миграции заряженных частиц. Кроме того, полуколичественный элементный анализ частиц подтвердил состав полученных образцов. Наличие элементов Ti и Sr было подтверждено без обнаружения других примесей. По данным атомных процентов по показателю (рис. 3, б) можно установить, что Ti/Sr составляет 81,10%/18,90% соответственно. Эти результаты подтверждают, что конструкции содержат ожидаемые элементы и не имеют значительных примесей.

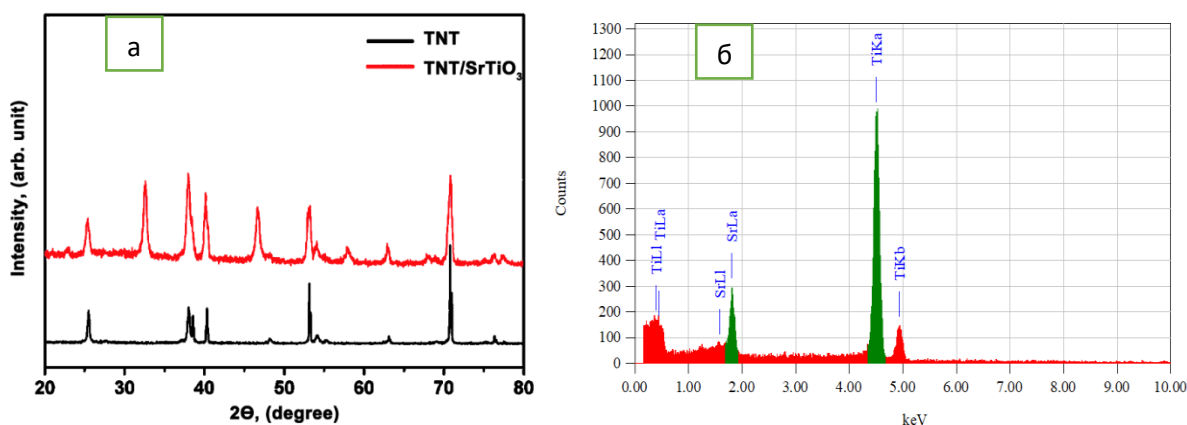


Рисунок 3 – Рентгеноструктурный анализ комбинированного TNT@SrTiO_3 – (а); полуколичественный элементный анализ частиц TNT@SrTiO_3 – (б)

Нанотрубки TiO_2 могут быть получены различными способами [19], среди которых наиболее широко изученным является использование электрохимического анодирования.

Преимуществом анодных нанотрубок TiO_2 перед нанотрубками TiO_2 , полученными другими методами, является их доступность и экономичность. Также, одним из преимуществ данного метода является то, что анодные нанотрубки TiO_2 растут вертикально на подложке Ti с отверстиями нанотрубок сверху и закрытыми нижними частями нанотрубок, прикрепленными к подложке Ti . Таким образом, дальнейшая иммобилизация на подложке не требуется. Слои нанотрубок TiO_2 (TNT) являются высокоупорядоченными, что способствует прямому пути диффузии. Кроме того, при необходимости, слои нанотрубок можно удалить с подложки Ti и использовать в виде порошков. Еще одним преимуществом является возможность контроля толщины слоя нанотрубок и диаметра нанотрубок путем регулирования электролита анодирования, потенциала и времени [20].

4. Заключение

В данной статье успешно продемонстрирован синтез массивов нанотрубок TiO_2 с использованием метода электрохимического анодирования. Полученные нанотрубки обладают четкими и открытыми концами, имеют длину 133,9 нм, а их мембраны имеют толщину более 1 мкм. Процесс анодирования Ti – фольги толщиной 0,1 мм при 450 °C позволяет легко получать такие массивы нанотрубок. Анализ сканирующей электронной микроскопии (SEM) показал, что TNT характеризуются четкими и открытыми концами трубок, со средним внешним диаметром 1 мкм и внутренним диаметром 69 нм, а их длина составляет 133 нм. Кроме того, в рамках исследования была создана комбинированная структура TNT@SrTiO_3 с использованием химических методов синтеза в автоклаве. Рентгенофазовый анализ подтвердил высокую кристалличность и ориентацию кристаллитов вдоль преимущественного направления роста, что указывает на успешное формирование структуры. Полученные результаты имеют потенциальное значение для различных областей, включая фотокаталитическое разложение воды под воздействием солнечного света и другие приложения в области конвертации и накопления энергии. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут способствовать развитию инновационных технологий и улучшению эффективности энергетических систем.

Список литературы

1. Zhang Z. TiO_2 nanotube arrays with a volume expansion factor greater than 2.0: Evidence against the field-assisted ejection theory / Z. Zhang, Q. Wang // *Electrochem. Commun.* – 2020. – V. 114. – P. 106717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106717>.
2. Galstyan V. Anodic TiO_2 nanotubes: A promising material for energy conversion and storage / V. Galstyan, M.J. Macak, T. Djenizian // *Appl. Mater. Today*. – 2022. – V. 29. – P. 101613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101613>.
3. Saddique Z. Bismuth-based nanomaterials-assisted photocatalytic water splitting for sustainable hydrogen production / Z. Saddique, M. Imran, A. Javaid // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.047>.
4. Разработка пористых структур на основе оксидных полупроводников / М.А. Бисенова и др. // *Вестник Горение И Плазмохимия*. – 2021. – Т. 19, вып. 1. DOI: <https://doi.org/10.18321/cpc409>.
5. The state-of-the-art review on rational design for cavitation assisted photocatalysis / S.J. Wang et al // *Mater. Des.* – 2023. – V. 234. – P. 112377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112377>.
6. State-of-the-art review on photocatalysis for efficient wastewater treatment: Attractive approach in photocatalyst design and parameters affecting the photocatalytic degradation / D.E. Lee et al // *Catal. Commun.* – 2023. – v. 183. – P. 106764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106764>.
7. A Review on TiO_2 Nanotubes: Influence of Anodization Parameters, Formation Mechanism, Properties, Corrosion Behavior, and Biomedical Applications / K. Indira et al // *J. Bio- Tribo-Corros.* – 2015/ – V. 1. – P. 28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0024-x>.
8. Electrochemical detection of 2,4,6-trinitrotoluene reduction in aqueous solution by using highly ordered 1D TiO_2 nanotube arrays / S. Moon et al // *Mater. Today Commun.* – 2020. – V. 25. – P. 101389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101389>.
9. Application of a new nano- TiO_2 composite antibacterial agent in nursing management of operating room: Based on real-time information push assistant system / A. Xiaoyan et al // *Prev. Med.* – 2023. – V.172. – P. 107541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2023.107541>.

10. Yin H. The large diameter and fast growth of self-organized TiO₂ nanotube arrays achieved via electrochemical anodization / H. Yin, H. Liu, W. Shen // *Nanotechnology*. – 2009. – V. 21, I. 3. – P. 035601. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/3/035601>.
11. Highly ordered combined structure of anodic TiO₂ nanotubes and TiO₂ nanoparticles prepared by a novel route for dye-sensitized solar cells / T. Ghani et al // *J. Saudi Chem. Soc.* – 2019. – V. 23, I. 8. – P. 1231-1240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2019.08.003>.
12. Получаемый из биоотходов многослойный графен/srTiO₃ как эффективная фотокаталитическая система / Ж. Куспанов и др. // *Вестник Горение И Плазмохимия*. – 2023. – V. 21, вып. 2. DOI: [https://doi.org/10.18321/cpc21\(2\)71-80](https://doi.org/10.18321/cpc21(2)71-80).
13. Anodic growth of TiO₂ nanotube arrays: Effects of substrate curvature and residual stress / W. Zhang, et al // *Surf. Coat. Technol.* – 2023. – V. 469. – P. 129783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129783>.
14. TiO₂ Nanotube Arrays of 1000 μm Length by Anodization of Titanium Foil: Phenol Red Diffusion / M. Paulose et al // *J. Phys. Chem. C*. – 2007. – V. 111, I. 41. – P. 14992-14997. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp075258r>.
15. Moulis F. Photocatalytic degradation of several VOCs (n-hexane, n-butyl acetate and toluene) on TiO₂ layer in a closed-loop reactor / F. Moulis, J. Krýsa // *Catalysis Today*. – 2013. – V. 209. – P. 153-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.10.017>.
16. Hou X. Controlling anodization time to monitor film thickness, phase composition and crystal orientation during anodic growth of TiO₂ nanotubes / X. Hou, P.D. Lund, Y. Li // *Electrochem. Commun.* – 2022. – V. 134. – P. 107168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107168>.
17. Ideally Hexagonally Ordered TiO₂ Nanotube Arrays / H. Sopha, et al // *Chemistry Open*. – 2017. – V. 6, I. 4. – P. 480-483. DOI: <https://doi.org/10.1002/open.201700108>.
18. Lee K. One-Dimensional Titanium Dioxide Nanomaterials: Nanotubes / K. Lee, A. Mazare, P. Schmuki // *Chem. Rev.* – 2014. – V. 114, I. 19. – P. 9385-9454. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr500061m>.
19. One-Step Decoration of TiO₂ Nanotubes with Fe₃O₄ Nanoparticles: Synthesis and Photocatalytic and Magnetic Properties / D. Beketova, et al // *ACS Appl. Nano Mater.* – 2020. – V. 3, I. 2. – P. 1553-1563. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b02337>.
20. Tak M. Synthesis of titanium nanotubes (TNT) and its influence on electrochemical micromachining of titanium / M. Tak, H. Tomar, R.G. Mote // *Procedia CIRP*. – 2020. – V. 95. – P. 803-808, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.140>.

References

1. Zhang Z. TiO₂ nanotube arrays with a volume expansion factor greater than 2.0: Evidence against the field-assisted ejection theory / Z. Zhang, Q. Wang // *Electrochem. Commun.* – 2020. – V. 114. – P. 106717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106717>. (In English).
2. Galstyan V. Anodic TiO₂ nanotubes: A promising material for energy conversion and storage / V. Galstyan, M.J. Macak, T. Djenizian // *Appl. Mater. Today*. – 2022. – V. 29. – P. 101613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101613>. (In English).
3. Saddique Z. Bismuth-based nanomaterials-assisted photocatalytic water splitting for sustainable hydrogen production / Z. Saddique, M. Imran, A. Javaid // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.047>. (In English).
4. Razrabotka poristikh struktur na osnove oksidnykh poluprovodnikov / M.A. Bisenova i dr. // *Vestnik Gorenje I Plazmokhimiya*. – 2021. – T. 19, vyp. 1. DOI: <https://doi.org/10.18321/cpc409>. (In Russian).
5. The state-of-the-art review on rational design for cavitation assisted photocatalysis / S.J. Wang et al // *Mater. Des.* – 2023. – V. 234. – P. 112377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112377>. (In English).
6. State-of-the-art review on photocatalysis for efficient wastewater treatment: Attractive approach in photocatalyst design and parameters affecting the photocatalytic degradation / D.E. Lee et al // *Catal. Commun.* – 2023. – v. 183. – P. 106764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2023.106764>. (In English).
7. A Review on TiO₂ Nanotubes: Influence of Anodization Parameters, Formation Mechanism, Properties, Corrosion Behavior, and Biomedical Applications / K. Indira et al // *J. Bio- Tribo-Corros.* – 2015/ – V. 1. – P. 28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0024-x>. (In English).

8. Electrochemical detection of 2,4,6-trinitrotoluene reduction in aqueous solution by using highly ordered 1D TiO₂ nanotube arrays / S. Moon et al // Mater. Today Commun. – 2020. – V. 25. – P. 101389. DOI: <https://10.1016/j.mtcomm.2020.101389>. (In English).
9. Application of a new nano-TiO₂ composite antibacterial agent in nursing management of operating room: Based on real-time information push assistant system / A. Xiaoyan et al // Prev. Med. – 2023. – V.172. – P. 107541. DOI: <https://10.1016/j.ypmed.2023.107541>. (In English).
10. Yin H. The large diameter and fast growth of self-organized TiO₂ nanotube arrays achieved via electrochemical anodization / H. Yin, H. Liu, W. Shen // Nanotechnology. – 2009. – V. 21, I. 3. – P. 035601. DOI: <https://10.1088/0957-4484/21/3/035601>. (In English).
11. Highly ordered combined structure of anodic TiO₂ nanotubes and TiO₂ nanoparticles prepared by a novel route for dye-sensitized solar cells / T. Ghani et al // J. Saudi Chem. Soc. – 2019. – V. 23, I. 8. – P. 1231-1240. DOI: <https://10.1016/j.jscs.2019.08.003>. (In English).
12. Poluchaemyi iz biootkhodov mnogoslownyi grafen/srtio3 kak ehffektivnaya fotokataliticheskaya sistema / ZH. Kuspanov i dr. // Vestnik Gorenje I Plazmokhimiya. – 2023. – V. 21, vyp. 2. DOI: [https://10.18321/cpc21\(2\)71-80](https://10.18321/cpc21(2)71-80). (In Russian).
13. Anodic growth of TiO₂ nanotube arrays: Effects of substrate curvature and residual stress / W. Zhang, et al // Surf. Coat. Technol. – 2023. – V. 469. – P. 129783. DOI: <https://10.1016/j.surfcoat.2023.129783>. (In English).
14. TiO₂ Nanotube Arrays of 1000 μm Length by Anodization of Titanium Foil: Phenol Red Diffusion / M. Paulose et al // J. Phys. Chem. C. – 2007. – V. 111., I. 41. – P. 14992-14997. DOI: <https://10.1021/jp075258r>. (In English).
15. Moulis F. Photocatalytic degradation of several VOCs (n-hexane, n-butyl acetate and toluene) on TiO₂ layer in a closed-loop reactor / F. Moulis, J. Krýsa // Catalysis Today. – 2013. – V. 209. – P. 153-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.10.017>. (In English).
16. Hou X. Controlling anodization time to monitor film thickness, phase composition and crystal orientation during anodic growth of TiO₂ nanotubes / X. Hou, P.D. Lund, Y. Li // Electrochem. Commun. – 2022. – V. 134. – P. 107168. DOI: <https://10.1016/j.elecom.2021.107168>. (In English).
17. Ideally Hexagonally Ordered TiO₂ Nanotube Arrays / H. Sopha, et al // Chemistry Open. – 2017. – V. 6, I. 4. – P. 480-483. DOI: <https://10.1002/open.201700108>. (In English).
18. Lee K. One-Dimensional Titanium Dioxide Nanomaterials: Nanotubes / K. Lee, A. Mazare, P. Schmuki // Chem. Rev. – 2014. – V. 114, I. 19. – P. 9385-9454. DOI: <https://10.1021/cr500061m>. (In English).
19. One-Step Decoration of TiO₂ Nanotubes with Fe₃O₄ Nanoparticles: Synthesis and Photocatalytic and Magnetic Properties / D. Beketova, et al // ACS Appl. Nano Mater. – 2020. – V. 3, I. 2. – P. 1553-1563. DOI: <https://10.1021/acsanm.9b02337>. (In English).
20. Tak M. Synthesis of titanium nanotubes (TNT) and its influence on electrochemical micromachining of titanium / M. Tak, H. Tomar, R.G. Mote // Procedia CIRP. – 2020. – V. 95. – P. 803-808, DOI: <https://10.1016/j.procir.2020.01.140>. (In English).

Благодарность.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта АР19680604. «Разработка фотокатализатора на основе нанотрубок TiO₂ с высокой фотокаталитической активностью», за что авторы выражают огромную благодарность.

М.А. Бисенова^{2,3*}, А.Г. Умирзаков^{1,2}, К.И. Мить², А.Л. Мереке^{1,2}, Ч.Б. Даулбаев³

¹Satbaev University,

050032, Қазақстан Республикасы, Сәтбаев көшесі, 22а

²Физика-техникалық институты,

050032, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Ибрагимов к-сі, 11

³Физико ядролық институт,

050032, Қазақстан Республикасы, Ибрагимов көшесі 3/1

*e-mail: m-bisenova@list.ru

SrTiO₃/TiO₂ ГИБРИДТІ ПЕРОВСКИТТІК НАНОТҮТІКШЕЛЕРДІ ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ АНОДТАУ ӘДІСІ АРҚЫЛЫ СИНТЕЗДЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Анодтау процесі арқылы пайда болған TiO_2 нанотүтікшелерінің қабаттары инновациялық конверсия және энергияны сақтау жүйелері контекстінде зерттеу саласында қолданылады. Титан нанотүтікшелері (TNT) өзінің ерекше қасиеттеріне, әсіресе беттік көлемнің жоғары қатынасына сондай-ақ, бұл оларды әртүрлі технологиялық қосымшалар үшін қажет материал ретінде пайдалануға болады. Анодтау әдісі қарапайымдылығы мен салыстырмалы арзандығына байланысты TNT өндіру үшін кеңінен қолданылады, бұл әдіс TiO_2 нанотүтікшелердің қалыңдығын дәл бақылауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, анодтауды титан нанотүтікшелерінде сәндік және түрлі-түсті жабындар жасау үшін пайдалануға болады. Бұл зерттеуде химиялық синтез әдістерін қолдана отырып, TiO_2 анодты нанотүтікшелері мен SrTiO_3 бөлшектерін қамтитын күрделі құрылым жасалды. TiO_2 нанотүтікшелері 30 вольт кернеуді пайдалана отырып, құрамында NH_4F және H_2O бар этиленгликольде анодтау әдісі арқылы алынды. 450 °C температурада термиялық өңдеуден өткен анодты нанотүтікшелер массиві сұйылтылған SrTiO_3 ерітіндісімен толтырылған автоклавқа орналастырылды. Сканерлеуші электронды микроскопияда (SEM) талдау көрсеткендей, TNT түтікшелері айқын және ашық ұштарымен сипатталады. Орташа сыртқы диаметрі 1,01 мкм және ішкі диаметрі 69 нм, ал ұзындығы 133 нм екенді көрсетілді.

Түйін сөздер: Фотокатализатор, TiO_2 , TNT, SrTiO_3 , анодтау.

M.A. Bissenova^{2,3*}, A.G. Umirzakov^{1,2}, K.I. Mit², A.L. Mereke^{1,2}, Ch.B. Daulbaev³

¹Satbaev University,

050032, Republic of Kazakhstan, 22a Satpayev str.

²Physical and Technical Institute,

050032, Republic of Kazakhstan, Almaty, Ibragimova str., 11

³Institute of Nuclear Physics,

050032, Republic of Kazakhstan, 3/1 Ibragimova str.

*e-mail: m-bisenova@list.ru

SYNTHESIS AND STUDY OF $\text{SrTiO}_3/\text{TiO}_2$ HYBRID PEROVSKITE NANOTUBES BY ELECTROCHEMICAL ANODIZATION

Layers of TiO_2 nanotubes formed through an anodization process are an area of active research in the context of innovative energy conversion and storage systems. Titanium nanotubes (TNT) have attracted attention due to their unique properties, especially their high surface-to-volume ratio, making them a desirable material for various technological applications. The anodizing method is widely used for the production of TNT due to its simplicity and relative cheapness, the method allows precise control of the thickness of TiO_2 nanotubes. Anodizing can also be used to create decorative and colored coatings on titanium nanotubes. In this study, a combined structure comprising anodic TiO_2 nanotubes and SrTiO_3 particles was created using chemical synthesis methods. TiO_2 nanotubes were prepared by anodizing in ethylene glycol containing NH_4F and H_2O using a voltage of 30 volts. The anodic nanotube array, heat-treated at 450°C, was then placed in an autoclave filled with a dilute SrTiO_3 solution. Scanning electron microscopy (SEM) analysis revealed that TNT are characterized by clear and open tube ends. With an average outer diameter of 1 μm and an inner diameter of 69 nm, and their length is 133 nm.

Key words: Photocatalyst, TiO_2 , TNT, SrTiO_3 , anodization.

Сведения об авторах

Мадина Бисенова* – младший научный сотрудник, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан; e-mail: m-bisenova@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8297-1684>.

Арман Умирзаков – научный сотрудник, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан; e-mail: a.umirzakov@sci.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0941-0271>.

Константин Мить – старший научный сотрудник, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан; e-mail: konstantin-mit@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0078-6723>.

Алмаз Мереке – научный сотрудник, Satbaev University, Физико-технический институт, Алматы, Казахстан; e-mail: mereke.almaz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8945-9648>.

Чингиз Даулбаев – PhD, ведущий научный сотрудник Института ядерной физики, Алматы, Казахстан; e-mail: chingis.daulbayev@nu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-7799>.

Авторлар туралы мәліметтер

Мадина Бисенова* – кіші ғылыми қызметкер, Физико-техникалық институт, Алматы, Қазақстан; e-mail: m-bisenova@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8297-1684>.

Арман Умирзаков – ғылыми қызметкер, Физико-техникалық институт, Алматы, Қазақстан; e-mail: a.umirzakov@sci.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0941-0271>.

Константин Мить – аға ғылыми қызметкер, Физико-техникалық институт, Алматы, Қазақстан; e-mail: konstantin-mit@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0078-6723>.

Алмаз Мереке – ғылыми қызметкер, Satbaev University, Физико-техникалық институт, Алматы, Қазақстан; e-mail: mereke.almaz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8945-9648>.

Чингиз Даулбаев – PhD, жетекші ғылыми қызметкер, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан; e-mail: chingis.daulbayev@nu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-7799>.

Information about the authors

Madina Bissenova* – junior researcher, Physico-Technical Institute, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m-bissenova@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8297-1684>.

Arman Umirzakov – researcher, Physico-Technical Institute, Almaty, Kazakhstan; e-mail: a.umirzakov@sci.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0941-0271>.

Konstantin Mit – senior researcher, Physico-Technical Institute, Almaty, Kazakhstan; e-mail: konstantin-mit@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0078-6723>.

Almaz Mereke – researcher, Satbaev University, Physico-Technical Institute, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mereke.almaz@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8945-9648>.

Chingiz Daulbaev – PhD, leading researcher, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: chingis.daulbayev@nu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-7799>.

Поступила в редакцию 15.03.2024

Поступила после доработки 05.06.2024

Принята к публикации 06.06.2024

DOI: 10.53360/2788-7995-2024-2(14)-53



МРНТИ 31.27.21

А.М. Рахимжанова¹, А.Е. Елубаева², Ө.К. Аксой³, Л.К. Кажыгелдиева¹

¹Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к-сі, 20А

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
10000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2

³Памуккале университеті,
Kınıklı Mh. Üniversite Cd. No:11 20160 Pamukkale, Denizli
e-mail: yelubaeva.ayaulym01gmail.com

ALOE VERA (L.) BURM.FIL. ЭКСТРАКТТАРЫНЫҢ АНТИОКСИДАНТТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Көптеген жылдар бойы «ғажайып өсімдік» ретінде белгілі алоэ вера, көптеген фармацевтикалық белсенділікке ие, соның ішінде іш жүргізу, қабынуға қарсы, имностимуляторлық, антисептикалық, жаралар мен күйіктерді емдеу, жараға қарсы, ісікке қарсы және қант диабетіне қарсы ROS (реактивті оттегі түрлерінің) делдалы болуы мүмкін. Өсімдіктің антиоксиданттық әсерін бағалау үшін осы зерттеудің бірінші бөлігінде алоэ вера жапырақтарының целлюлоза және гель бөліктерінен бөлек дайындалған су сығындыларының антиоксиданттық белсенділігі бірнеше антиоксиданттық сынақтар арқылы бағаланды. Осы зерттеу алоэ вера жапырақтарының целлюлозасынан алынған су сығындысында аскорбин қышқылы, бета-каротин, альфа-токоферол, фенолдар және флавоноидтарды қоса алғанда, табиғи антиоксиданттық компоненттер бар екендігі анықталды.

Алоэ вера жапырақтарының целлюлозасынан алынған су сығындысы антиоксидант ретінде темір мен аскорбин қышқылынан туындаған фосфатидилхолин липосомаларының асқын тотығуын тежейді, 2,2'-азино-бис- (3-этилбензтиазолин-6-сульфоқышқылдар), 2,2-Дифенил-1-пикрилгидразил және супероксидті радикалдарды жояды, қалпына келтіру қабілетіне ие және антиоксиданттардың табиғи көзі ретінде қолданыла алады деген қорытынды жасалды. А. Vera гелі 2,2-Дифенил-1-пикрилгидразил радикалды тазарту сынағы арқылы анықталған антиоксиданттық белсенділікті көрсетпеді.