

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Объект авторского права
УДК 621.794.61

КУПРЕЕВА
Ольга Владимировна

**ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОЕВ
АНОДНОГО ОКСИДА ТИТАНА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы
для электроники и фотоники)

Минск 2024

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Лазарук Сергей Константинович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты **Прищепа Сергей Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Ефименко Сергей Афанасьевич, кандидат технических наук, главный конструктор открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Оппонирующая организация

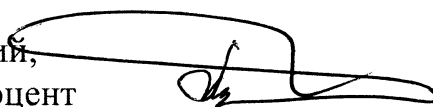
Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится «19» декабря 2024 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovets@bsuir.by, тел. +375 17 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «18» ноября 2024 г.

И. о. ученого секретаря
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, доцент



М. В. Тумилович

ВВЕДЕНИЕ

Создание материалов с принципиально новыми характеристиками неразрывно связано с получением наноразмерных систем. Формирование наноструктурированных слоев оксида титана является актуальной задачей для разработки эффективных и функциональных фотоэлектролизных устройств, датчиков, систем для очистки воды и воздуха от органических и неорганических загрязнений, антиотражающих покрытий, устройств магнитоэлектроники, изделий медицинского назначения (благодаря электретым и оптическим свойствам, а также высокой степенью совместимости с тканями организма). Оксид титана – относительно недорогой материал, в настоящее время считается одним из наиболее перспективных фотокатализаторов и может применяться для создания самоочищающихся и антибактериальных покрытий, а также также выступать в качестве носителя при создании фотокаталитически активных композитов, содержащих наночастицы металлов.

Пористое анодное окисление титана дает возможность получать наноструктурированные пленки оксида титана. Электрохимическое анодное окисление титана за счет выбора электрических режимов анодного процесса позволяет формировать слои оксида титана с высокой степенью самоорганизации и широким диапазоном размеров наноструктур, предоставляя возможность варьировать их с точностью до единиц нанометров; при этом не требуется дорогое и сложное оборудование. Применение наноструктурированных слоев оксида титана в качестве формозадающих матриц позволяет формировать наноструктуры на основе новых материалов и тем самым использовать их новые свойства, возникающие в наноразмерном состоянии. На электронные и оптические характеристики оксида титана как полупроводника существенное влияние оказывают примесные элементы, находящиеся в его составе. Однако это влияние мало изучено, особенно для наноструктур.

Актуальными проблемами являются разработка методик управления морфологией поверхности и достижения высокой упорядоченности слоев анодного оксида титана, описание механизмов формирования слоев анодного оксида титана с различной морфологией, а также решение задачи повышения эффективности и расширения функциональности покрытий, используемых в области медицины, в производстве фотоэлектролизных устройств, датчиков, систем для очистки воды и воздуха от органических и неорганических загрязнений, антиотражающих покрытий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации соответствует направлению 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: наноматериалы и нанотехнологии, нанодиагностика» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156.

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на базе НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» в рамках заданий государственных программ научных исследований: «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», задание 2.4.16 «Разработать технологию формирования наноструктурированных оксидов тугоплавких металлов на основе электрохимического анодирования и изготовить на их основе электрооптические устройства» (№ ГР 20113152, 2011–2013 гг.); «Конвергенция», задание 3.2.02 «Исследование и разработка чувствительных структур на основе оксидов титана и алюминия для электрохимических и мембранных биосенсоров» (№ ГР 20120406, 2011–2015 гг.); «Конвергенция», задание «Модификация фотокаталитической активности наноструктурированных оксидов и создание на их основе модельного устройства для фотокаталитической очистки воды от органических и бактерицидных загрязнений» (№ ГР 20142490, 2014–2015 гг.); «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», задание 2.44 «Формирование самоупорядоченных пленок оксида титана для темплатного синтеза магнитных нанокомпозитов» («Темплатно-ассистированный синтез магнитных нанокомпозитов для новых элементов обработки информации») (№ ГР 20162648, 2016–2020 гг.); «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 2.20 «Формирование наноструктурных высокоупорядоченных пленок оксидов вентильных металлов для темплатного синтеза на их основе нанокомпозитных материалов с новыми свойствами» (№ ГР 20212295, 2021 г.); «Конвергенция-2025», задание 3.03.3.4 «Формирование пленок оксидов тугоплавких металлов ряда Ti, Ta, Nb со встроенным электрическим зарядом требуемой полярности и заданными оптическими свойствами для медицинских применений» (№ ГР 20212294, 2021 г.).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является установление закономерностей формирования слоев наноструктурированного ячеистого и трубчатого оксида титана на поверхности тонких пленок, фольги и массивных образцов из титана при их электрохимическом анодном окислении и определение особенностей их морфологии и свойств, перспективных для применения в устройствах магнитной записи информации и системах очистки воды от органических загрязнений.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие *задачи*:

- провести анализ состояния исследований, посвященных формированию, свойствам и перспективам применения наноструктурированного оксида титана;

- разработать методику формирования слоев наноструктурированного ячеистого и трубчатого оксида титана на поверхности тонких пленок, фольги и массивных образцов из титана путем их электрохимического анодного окисления;

- установить закономерности влияния режимов электрохимического анодного окисления титана на структуру и морфологию формируемых слоев оксида титана;

- исследовать оптические, электретные и фотокаталитические свойства слоев наноструктурированного оксида титана, сформированного электрохимическим анодным окислением титана;

- разработать и исследовать перспективные применения наноструктурированного оксида титана для устройств магнитной записи информации и в системах очистки воды от органических загрязнений.

Объект исследования – анодный наноструктурированный оксид титана.

Предмет исследования – морфологические параметры, фотокаталитические, оптические и электретные свойства анодного наноструктурированного оксида титана.

Научная новизна

1. Предложен механизм образования трубчатого оксида титана, основанный на интенсификации электрохимического окисления титана в области барьерного слоя у дна пор, где повышена плотность протекающего анодного тока, вследствие чего повышается температура этих областей. При температуре барьерного слоя выше рассчитанного порогового значения имеет место переход от ячеистой гексагональной пористой структуры к трубчатой.

2. Установлено методом БЭТ-анализа увеличение на порядок (в 5–10 раз) удельной площади активной поверхности наноструктурированного слоя оксида титана при формировании двустенного трубчатого оксида титана по сравнению с одностенным трубчатым оксидом титана.

3. Для двустенного трубчатого оксида титана установлено влияние примесного углерода на его фотокаталитическую активность и зарегистрировано увеличение фотокаталитической активности на 30–40 % в видимой и в 1,5–2 раза – в ультрафиолетовой частях спектра.

4. Установлено увеличение значения коэцидивной силы на 20–25 % ферромагнитных пенек Co/Pd на поверхности формозадающей матрицы из пористого оксида титана с порами диаметром 20–30 нм и толщиной стенок пор 60–85 нм по сравнению со структурой на основе сплошных пленок из этого материала, объясняемое дополнительным пиннингом доменных стенок на границах пор.

Положения, выносимые на защиту

1. Механизм трансформации первоначально образующихся в оксидном слое наноразмерных пористых гексагональных ячеек в нанотрубки с внешним диаметром 45–250 нм при электрохимическом анодном окислении титана в электролитах на основе раствора фторида аммония в этиленгликоле при плотности протекающего анодного тока более 0,7 мА/см² и анодном напряжении более 30 В обусловлен разогревом барьерного слоя на дне пор выделяемым джоулевым теплом. При этом значение коэффициента объемного роста формируемого оксида превышает 2, что приводит к механическим напряжениям, инициирующим их разделение на нанотрубки.

2. Модельные представления об упругих напряжениях в нанотрубках из оксида титана, возникающих в процессе формирования при температуре фторсодержащего электролита, пониженной до 0–5 °С, и анодном напряжении, увеличенном до 60–80 В, обеспечивающим коэффициент объемного роста оксида от 2,6 до 3,5, и об их релаксации в процессе последующего отжига при 450–750 °С объясняют экспериментально установленное возникновение двустенной структуры трубок с их внешним диаметром 150–250 нм, удельная площадь поверхности слоя из которых, по сравнению со слоем из одностенных нанотрубок (20–40 м²/см³), увеличена до 100–400 м²/см³.

3. Повышенные по сравнению с ранее применявшимися в других работах анодные напряжения, используемые при формировании двустенных нанотрубок из оксида титана, обеспечивают встраивание в него атомов углерода с концентрацией 4–5 ат.% из электролита, что за счет образования подуровней в запрещенной зоне оксида титана увеличивает его

фотокаталитическую активность в видимой части спектра до 30–40 %, а в ультрафиолетовой – в 1,5–2 раза по сравнению с оксидом титана с одностенными нанотрубками.

4. Экспериментально обнаруженное увеличение на 20–25 % коэрцитивной силы структур из ячеистого пористого анодного оксида титана (диаметр пор 20–30 нм, толщина стенок пор 60–85 нм) с осажденным на него ферромагнитным слоем Co/Pd толщиной 12,7 нм, по сравнению со сплошными слоями из этого материала, достигается за счет дополнительного пиннинга доменных стенок на границах пор. Это перспективно для применения в устройствах магнитоэлектроники, поскольку позволяет использовать такие материалы для магнитной записи информации и преодолеть суперпарамагнитный предел.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Личный вклад соискателя заключается в выборе направления и постановке задачи исследований, анализе и интерпретации результатов, а также в непосредственном выполнении основных исследований. В диссертации представлены результаты работ, выполненных автором лично и в соавторстве. Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. Выбранная тема потребовала различных междисциплинарных знаний и не могла быть изучена без участия специалистов разных областей.

Автор признательна своим коллегами соавторам, без помощи которых выполнение работы было бы невозможно. Обсуждение целей и задач работы, а также основных научных результатов проводилось совместно с научным руководителем доктором физико-математических наук, профессором С. К. Лазаруком и доктором физико-математических наук, профессором В. Е. Борисенко. Автор осуществляла изготовление экспериментальных образцов, постановку экспериментов по исследованию фотокаталитических свойств, а также подготовку образцов к исследованиям. Научный сотрудник НИЛ 4.12 Д. А. Сасинович принимал участие в подготовке эксперимента по получению образцов пористого анодного оксида титана. Исследование морфологии образцов осуществлялось в НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», а также в Исследовательском центре Юлиха (Германия) при участии профессора Д. Грютцмахера. Автор принимала непосредственное участие в написании статей, подготовке и презентации докладов. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований, включенные в диссертацию, были представлены на: Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина, 2013 г.), Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, Россия, 2010, 2012 гг.), Международном семинаре «Новые подходы к высоким технологиям: нанодизайн, технологии, компьютерное моделирование» (NDTSC: International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations) (Минск, Беларусь, 2017 г.), Международной конференции Nanomeeting (Минск, Беларусь, 2011, 2013, 2015, 2019 гг.).

Использование результатов диссертации подтверждено актами их практического применения и внедрения в образовательный процесс БГУИР.

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертации опубликована 31 печатная работа: 15 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и иностранных научных изданиях (объемом 7,5 авторских листа), 16 статей в сборниках материалов международных конференций. Общий объем опубликованных печатных работ составляет 10,5 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и 1 приложения. Список использованных источников включает библиографический список из 138 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 31 наименования.

Общий объем диссертационной работы составляет 141 страницу, из них 90 страниц основного текста, 64 рисунка на 26 страницах, 10 таблиц на 5 страницах и 1 приложение на 2 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и в **общей характеристике работы** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы, включающий основные сведения о методах синтеза слоев оксида титана, процессе электрохимического анодирования,

методиках получения слоев наноструктурированного оксида титана методом электрохимического анодирования, преимуществах данного метода, свойствах оксида титана, возможностях его практического использования, а также анализ теорий, описывающих механизм формирования трубчатого оксида титана. Показана перспективность разработки методик получения и анализа свойств слоев оксида титана для создания систем очистки воды от органических загрязнений, устройств магнитной записи информации, а также для применения в области медицины.

Во **второй главе** изложены методики изготовления экспериментальных образцов и методы проведения исследования их свойств.

Формирование слоев анодного оксида титана проводили в двухэлектродной электрохимической ячейке в комбинированном режиме в 0,1 М и 5,4 М растворе фторида аммония в этиленгликоле, а также в 0,1 М растворе фторида аммония в этиленгликоле с добавлением 2 об.% воды. В качестве исходных образцов использовались фольга технического титана чистотой 99,5 % и толщиной 50–200 мкм, а также титановые пленки толщиной 0,27 мкм, осажденные на кремниевые подложки, и титановая проволока диаметрами 50 и 500 мкм. Часть сформированных слоев была подвергнута температурной обработке на воздухе при температурах $(450 \pm 20)^\circ\text{C}$ и $(600 \pm 20)^\circ\text{C}$ и времени выдержки 60 мин.

Морфологические параметры экспериментальных образцов исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ); анализ элементного состава экспериментальных образцов проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС), фазового состава – с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС). Также был разработан и изготовлен макет установки для исследования фотокаталитических свойств анодных слоев оксида титана. Спектры поглощения раствора органического красителя метиленового синего, использующегося для оценки фотокаталитических свойств экспериментальных образцов, исследовали с помощью спектрофотометра для видимой и УФ-областей спектра. За нулевой уровень был принят спектр поглощения дистиллированной воды. Конечная, используемая для анализа фотокаталитической активности образцов оптическая плотность раствора метиленового синего представляет собой относительную оптическую плотность A/A_0 , которая линейно связана с концентрацией метиленового синего в растворе (относительная концентрация, упоминающаяся в данной работе, – это C/C_0 , где C – концентрация метиленового синего в растворе, отобранная в определенный момент времени; C_0 – исходная концентрация метиленового синего в растворе). Следовательно, относительная оптическая плотность может быть непосредственно использована как относительная концентрация метиленового синего в растворе.

В третьей главе приведены результаты исследования структурно-морфологических свойств анодного оксида титана, а также описан механизм формирования трубчатого анодного оксида титана.

Исследование структуры пористого оксида титана на разных этапах формирования показало, что рост пористого оксида титана начинается с образования барьерного слоя на поверхности титана, после чего происходит рост пор внутри барьерного слоя, то есть пористого оксида с гексагональными ячейками, которые при механическом воздействии на образец раскалываются по центрам ячеек (по порам). Увеличение продолжительности анодирования приводит к формированию трубчатой структуры оксида, поперечное раскалывание которого происходит по границам ячеек. Непосредственно после процесса анодирования оксид титана является аморфным. Во время термического отжига происходит преобразование аморфной фазы оксида титана в кристаллическую (тип анатаз), причем оксид титана, отожженный при 600 °С, имеет более ярко выраженную фазу анатаза по сравнению с оксидом титана, отожженным при 450 °С. Для трубчатого оксида титана с внешним диаметром трубок от 100 до 250 нм и малой пористостью (до 10 %) термическая обработка приводит к отделению внутренней части трубки от внешней, что, в конечном счете, обеспечивает формирование двустенной трубчатой структуры (рисунок 1).

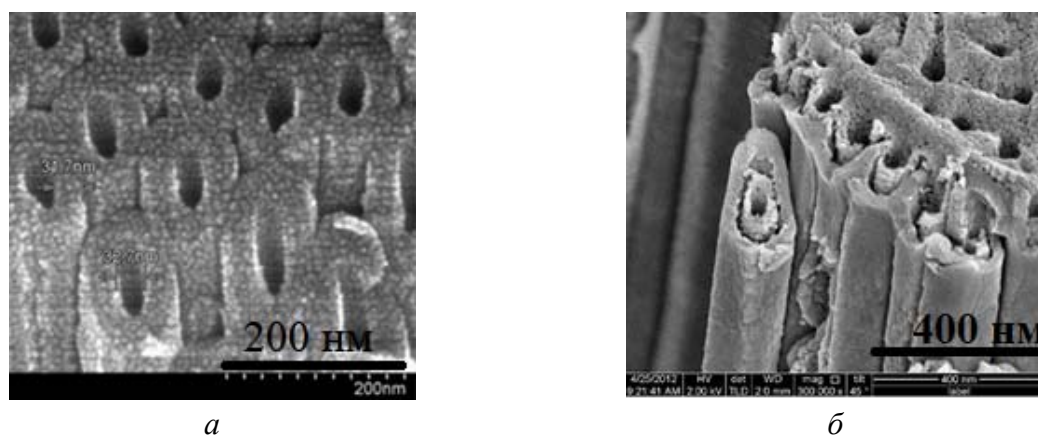


Рисунок 1 – СЭМ-фотографии поперечного сечения верхней части наноструктурированного слоя оксида титана, сформированного анодированием титановой фольги в 0,3 %-ном растворе фторида аммония в этиленгликоле с добавлением 2 об. % воды: *а* – при напряжении 75 В; *б* – после термической обработки

Электрохимическое анодное окисление титана в органических электролитах, содержащих ионы фтора, при плотности протекающего анодного тока менее 0,7 мА/см² ведет к образованию пористого оксида титана с ячеистой структурой типа

пчелиных сот, а при плотности протекающего анодного тока, превышающей эту величину, и анодном напряжении более 30 В – к трансформации гексагональных ячеек типа пчелиных сот в нанотрубки с внешним диаметром 45–250 нм. При возрастании плотности анодного тока происходит разогрев барьерного слоя на дне пор выделяемым джоулевым теплом, которое интенсифицирует окислительный процесс в разогреваемых областях, при этом коэффициент объемного роста формируемого оксида превышает 2, что в условиях ограниченного объема гексагональных ячеек приводит к механическим напряжениям, инициирующим их разделение на нанотрубки.

В процессе одного эксперимента при одинаковых электрических режимах анодного окисления изменение температуры электролита от комнатной до отрицательных значений обеспечивает уменьшение коэффициента теплопередачи за счет увеличения вязкости электролита и увеличение разницы температур между разогретым барьерным слоем и электролитом и, таким образом, переход от ячеистой структуры к образованию трубчатой структуры оксида (рисунок 2).

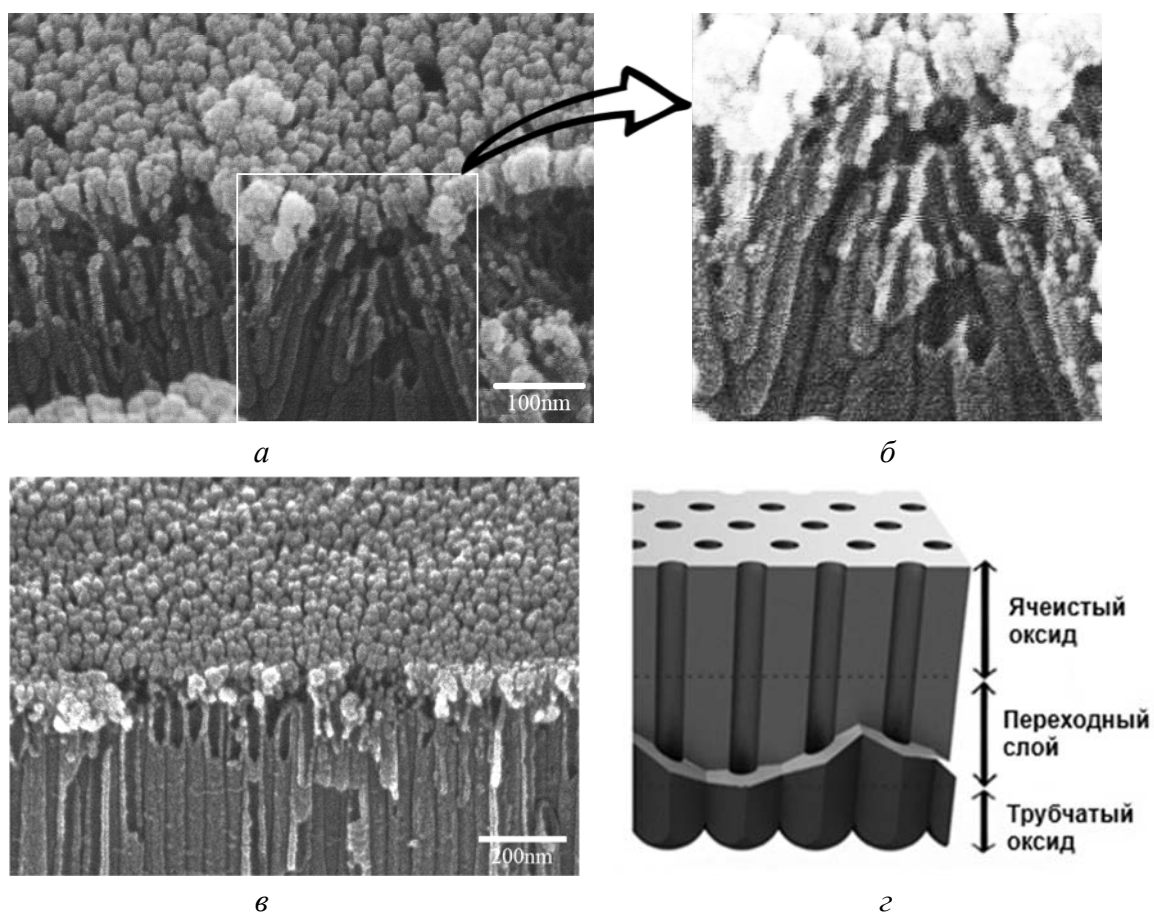


Рисунок 2 – СЭМ-изображения слоев анодного оксида титана, полученных в процессе постепенного понижения температуры электролита во время анодирования титана: *а, б* – при плотности тока 0,3 мА/см²; *в* – 0,5 мА/см²; *г* – схематическое изображение сформированных структур

Оценка разницы температур между барьерным слоем оксида титана и электролитом в процессе анодирования была проведена расчетным методом, основанном на теории подобия, позволяющей определить коэффициент теплопередачи (КТП) в системе оксидный слой–электролит с учетом теплопроводности и конвекции в этих материалах. Коэффициент теплопередачи в исследуемой системе определяли по формуле:

$$h = Nu \cdot K_m / L, \quad (1)$$

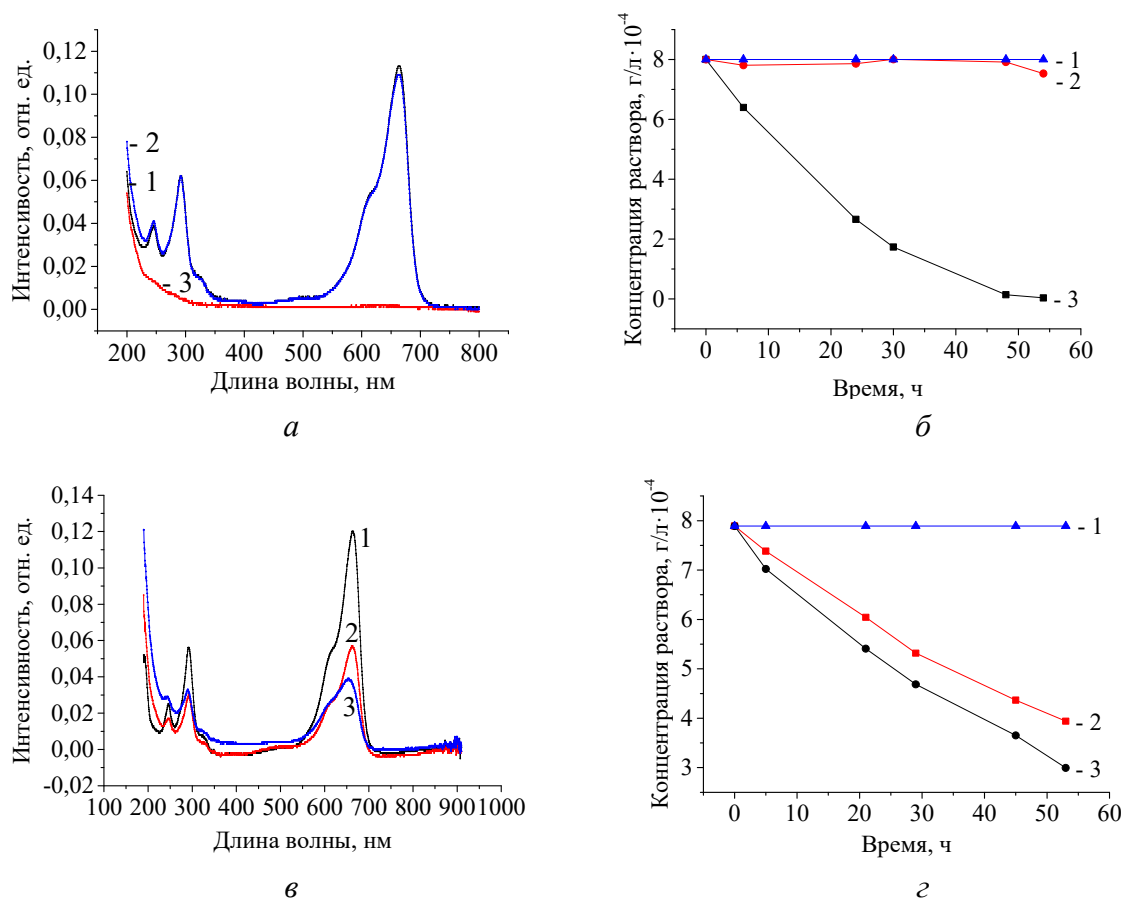
где Nu – число Нуссельта (соотношение между интенсивностями теплообмена за счет конвекции и теплопроводности в условиях неподвижной среды); K_m – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К) – теплопроводность; L – характерный размер поверхности теплообмена, определяемый как отношение площади к периметру.

Расчетные данные полностью согласуются с результатом эксперимента. Можно утверждать, что при переходе от формирования оксида титана с пористой структурой типа пчелиных сот (ячеистой) к формированию оксида титана с трубчатой структурой имеет место повышение температуры барьерного слоя формируемого оксида.

В **четвертой главе** приведены результаты исследования фотокаталитических, оптических и зарядовых свойств анодного оксида титана.

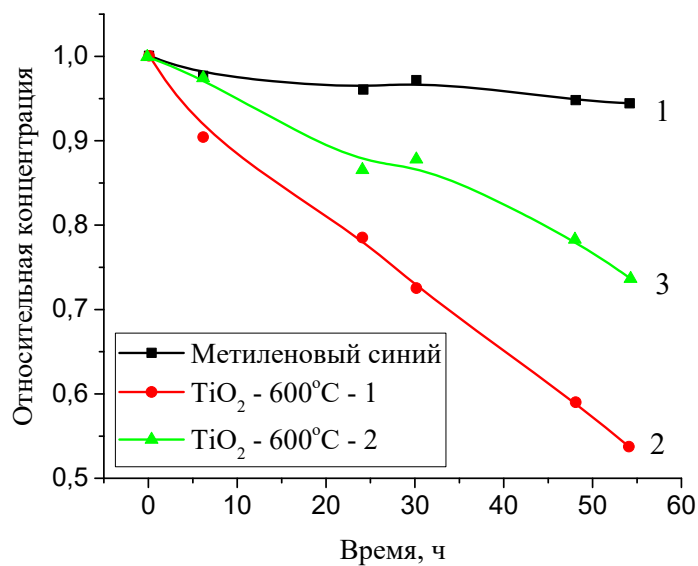
Наноструктурированный оксид титана, легированный атомами углерода, в значительной степени ускоряет процесс разложения органического красителя метиленового синего под воздействием светового потока УФ- и видимого диапазонов (рисунок 3).

Ускоренное разложение органического красителя в контакте с наноструктурированным оксидом титана под действием излучения видимого диапазона можно объяснить наличием примесей углерода и фтора, встроенных из электролита в слои наноструктурированного оксида титана в процессе анодирования. Примесные элементы образуют подуровни внутри запрещенной зоны оксида титана, уменьшая ее эффективную ширину до 2,7–2,8 эВ (вместо 3,0–3,1 эВ в чистом TiO_2). Поэтому исследуемый материал способен поглощать свет как УФ-, так и видимого диапазона.

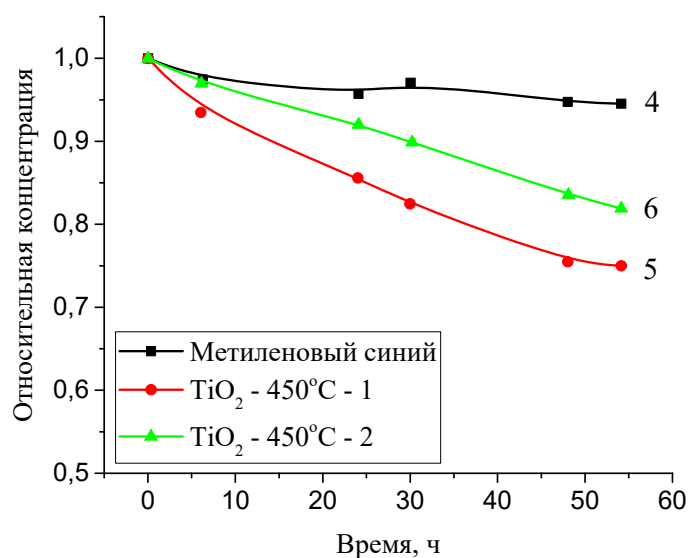


1, 2 – исходный и контрольный растворы; 3 – раствор с оксидом титана
Рисунок 3 – Спектры поглощения раствора метиленового синего (а, в)
и изменение концентрации C метиленового синего в водном растворе (б, з),
подвергнутом облучению излучением УФ- (а, б) и видимого (в, з) диапазонов

Фотокаталитическая активность образцов на основе оксида титана с двойными стенками трубок выше, чем у образцов с одностенными трубками, поскольку площадь активной поверхности у таких образцов больше. Оксид титана, отожженный при температуре 600 °С, демонстрирует более высокую фотокаталитическую активность, чем отожженный при 450 °С. При повторном использовании активность оксида титана как фотокатализатора снижается, причем как для слоев, отожженных при 450 °С, так и для слоев, отожженных при 600 °С (рисунок 4).



a



б

1, 4 – исходный раствор; 2, 3 – растворы с оксидом титана, отожженным при 600 °С 1-го и 2-го использования соответственно; 5, 6 – растворы с оксидом титана, отожженным при 450 °С, 1-го и 2-го использования соответственно

Рисунок 4 – Деградация раствора метиленового синего

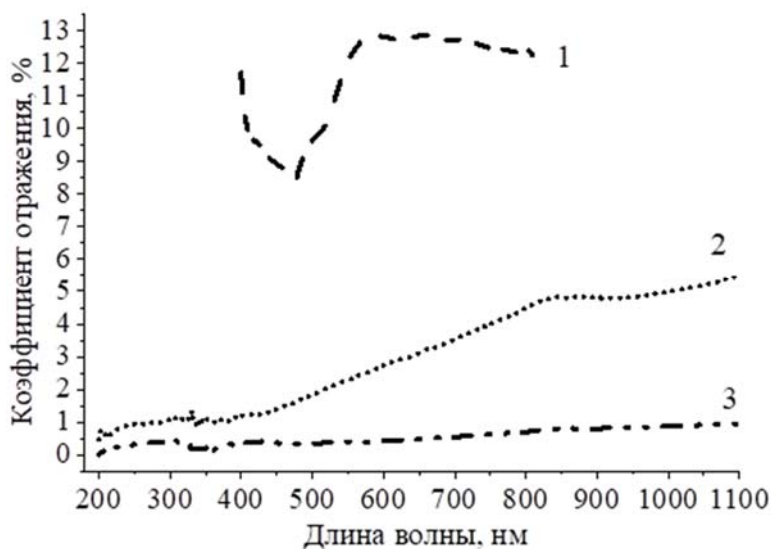
Анодный оксид титана обладает электретными свойствами. Значение поверхностного потенциала зависит от толщины анодного слоя: чем толще слой, тем больше значение его поверхностного потенциала. Для оценки сохранности заряда с течением времени проводили измерения поверхностного потенциала на полученных слоях оксида титана с интервалом 7–10 дней.

Результаты измерений представлены в таблице 1. Наличие поверхностного заряда в слоях анодного оксида титана можно объяснить внедрением анионов электролита в формируемое покрытие, которые действуют как донорные центры в запрещенной зоне оксида титана и могут выступать в роли электронных ловушек. В то же время изоляционный характер самого оксида титана обеспечивает относительную стабильность объемного заряда. Установлено, что для данного типа образцов достигается длительное время сохранения поверхностного потенциала

Таблица 1 – Результаты измерений поверхностного потенциала на слоях оксида титана с течением времени

Напряжение формовки, при котором получен слой оксида титана, В	Значение поверхностного потенциала, мВ		
	10 дней	17 дней	27 дней
30	-5	-28	-30
60	7	6	-15
90	42	85	-26
120	80	95	-40

Анализ спектров отражения наноструктурированного оксида титана с различной морфологией поверхности (рисунок 5) показал, что оксид титана продемонстрировал антиотражающий эффект для всех изученных форм. Минимальный отражающий сигнал наблюдался для трубчатого оксида титана с упорядоченной гексагональной структурой (после ионно-плазменного травления).



1 – столбики оксида титана; 2, 3 – трубчатый оксид титана после ионного травления и ультразвуковой обработки соответственно

Рисунок 5 – Спектры отражения наноструктурированных слоев оксида титана

В **пятой главе** предложены и обоснованы варианты использования слоев оксида титана в электронике, медицине и для устройств фотокаталитической очистки воды.

Описан вариант применения слоев наноструктурированного оксида титана в качестве матриц для нанесения магнитных материалов и создания таким образом магнитных наноструктур с новыми свойствами. Нанесение многослойных пленок Co/Pd на рельефные подложки существенно изменяет их морфологию и приводит к формированию развитого рельефа поверхности. В пористых пленках увеличивается значение коэрцитивной силы H_C за счет дополнительного пиннинга доменных стенок на границах пор (таблица 2). Применение таких пленок в устройствах магнитоэлектроники позволяет сделать их более устойчивыми к внешним магнитным полям и уберечь их от размагничивания.

Таблица 2 – Значения коэрцитивной силы H_C сплошной и пористой многослойных пленок Pd/[Co0.3nm/Pd0.55nm]/Pd, полученные из кривых намагниченности $M(H)$

Пленка	H_C , кЭ	
	H_{\parallel}	H_{\perp}
Сплошная	0,4	2,2
Пористая	0,5	2,7

Предложена методика электрохимической обработки поверхности титановых пластин, использующихся при хирургическом лечении переломов костей. Рельефная поверхность титана в сравнении с гладкой способствует большей интеграции с костной тканью. Кроме того, отрицательный потенциал на поверхности наноструктурированного оксида титана способен ускорить регенерацию костной ткани и обеспечить тромборезистивный эффект.

Экспериментально оценена эффективность наноструктурированного оксида титана в отношении микробиологического загрязнения воды бактериями синегнойной палочки (*Ps. Aeruginosa*) и смешанной микрофлорой. Антимикробный эффект экспериментальных образцов проявляется в случае активирования их как ультрафиолетовым излучением, так и излучением видимого диапазона.

В **Приложении А** представлены акты внедрения и использования результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Описан механизм трансформации первоначально образующихся в оксидном слое наноразмерных пористых гексагональных ячеек типа пчелиных сот в нанотрубки с внешним диаметром 45–250 нм при электрохимическом анодном окислении титана в электролитах на основе раствора фторида аммония в этиленгликоле при плотности протекающего анодного тока более 0,7 мА/см² и анодном напряжении более 30 В [6–А, 16–А].

2. Установлено, что при возрастании плотности анодного тока происходит разогрев барьерного слоя на дне пор выделяемым джоулевым теплом, которое интенсифицирует окислительный процесс в разогреваемых областях. При этом коэффициент объемного роста формируемого оксида превышает 2, что в условиях ограниченного объема гексагональных ячеек приводит к механическим напряжениям, инициирующим их разделение на нанотрубки. Показано, что при анодировании титана переход от пористой структуры типа пчелиных сот к трубчатой в органических электролитах, содержащих ионы фтора, имеет место при удельной мощности выделяемого джоулевого тепла 1–2 мВт/см² и более [1–А, 6–А, 13–А, 30–А].

3. Экспериментально установлено, что термическая обработка при 450–750 °С трубчатого оксида титана с внешним диаметром трубок 150–250 нм, полученного электрохимическим анодным окислением титана при напряжении 60–80 В и температуре фторсодержащего электролита 0–5 °С, приводит к образованию в уже сформированных трубках двустенной структуры с внутренними трубками диаметром 50–75 нм за счет релаксации накопленных внутренних напряжений, возникающих при коэффициенте объемного роста оксида более 2,6 [1–А, 2–А, 9–А, 17–А, 20–А, 21–А, 24–А, 25–А, 26–А, 29–А].

4. С помощью БЭТ-анализа установлено, что удельная площадь поверхности оксида титана с двойными стенками трубок составляет 100–400 см²/см³, в то время как для оксида титана с одностенными трубками эта величина находится в пределах 20–40 м²/см³ [2–А, 19–А].

5. Экспериментально установлено, что электрохимическое анодное окисление титана в электролитах на основе фторида аммония в этиленгликоле при напряжении формовки 65–75 В сопровождается встраиванием в анодный оксид титана атомов углерода с концентрацией 4–5 ат.% из электролита, что объясняет увеличение до 2,1 коэффициента объемного роста формируемого оксида [2–А, 10–А, 11–А, 12–А, 15–А, 25–А, 31–А].

6. Установлено, что примесные атомы углерода образуют подуровни в запрещенной зоне в оксиде титана с двойными стенками трубок, изменяя

ее эффективную ширину и тем самым увеличивая его фотокаталитическую активность в видимой части спектра на 40 % и в 1,5–2 раза – в ультрафиолетовой по сравнению с оксидом титана с одностенными нанотрубками [2–А, 10–А, 12–А, 14–А, 18–А, 22–А, 27–А].

7. Установлено, что использование слоев из пористого оксида титана с порами диаметром 20–30 нм и толщиной стенок пор 60–85 нм в качестве матрицы для ферромагнитного наполнителя позволяет на 20–25 % увеличить значение коэрцитивной силы такой структуры по сравнению со сплошными пленками из этого материала благодаря закреплению магнитных моментов на краях пор во время перемагничивания. Это перспективно для применения в устройствах магнитоэлектроники как альтернатива использованию массивов магнитных наноточек для создания сред записи информации, позволяя устранить суперпарамагнитный предел [3–А, 4–А, 5–А, 7–А, 8–А, 23–А, 28–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Изменение морфологии пленок CoPd путем их осаждения на пористые матрицы из наноструктурированного анодного оксида титана ведет к изменению их магнитных свойств и может быть эффективным методом адаптации механизма перемагничивания с одновременной стабилизацией ориентации намагниченности при комнатной температуре за счет усиленного пиннинга доменных стенок. Такие пленки рассматриваются как перспективные материалы для регистрирующих сред высокой плотности, систем визуализации распределения магнитных полей и сенсоров магнитных туннельных переходов.

2. Результаты исследования фотокаталитической активности наноструктурированного оксида титана свидетельствуют о перспективности его использования в устройствах для очистки и доочистки воды в местах водозабора, поскольку он обладает бóльшей активной поверхностью, чем известные микроструктурированные материалы, применяемые для очистки воды.

3. Предложенная методика формирования слоев оксида титана дает возможность управлять морфологией поверхности и размером структурных элементов, что перспективно в хирургии для контроля процесса регенерации костной ткани на титановых конструкциях.

4. Результаты анализа спектров отражения слоев оксида титана с различной морфологией поверхности свидетельствуют о перспективности его использования в качестве антиотражающих покрытий.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с требованиями п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Effect of the Electrolyte Temperature on the Formation and Structure of Porous Anodic Titania Film / S. K. Lazarouk, D. A. Sasinovich, O. V. Kupreeva, T. I. Orehovskaya, N. Rochdi, F. Arnaud d'Avitaya, V. E. Borisenko // *Thin Solid Films*. – 2012. – Vol. 526. – P. 41–46.

2–А. Fabrication of Double-Walled Titania Nanotubes and Their Photocatalytic Activity / K. Liang B. K. Tay, O. V. Kupreeva, T. I. Orekhovskaya, S. K. Lazarouk, V. E. Borisenko // *ACS Sustainable Chem. Eng.* – 2014. – Vol. 2. – P. 991–995.

3–А. Влияние морфологии на механизмы перемагничивания многослойных тонких пленок Co/Pd // Ю. В. Касюк, А. А. Максименко, Ю. А. Федотова, M. Marszałek, С. К. Лазарук, О. В. Купреева // *Физика твердого тела*. – 2016. – № 11 (58). – С. 2312–2319.

4–А. Structure and Magnetic Properties of Co/Pd Multilayers Prepared on Porous Nanotubular TiO₂ Substrate // A. Maximenko, M. Marszałek, J. Fedotova, A. Zarzycki, Y. Zabala, O. Kupreeva, S. Lazarouk, J. Kasiuk, S. Zavadski // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2017. – Vol. 434. – P. 157–163.

5–А. Effect of Flattened Surface Morphology of Anodized Aluminum Oxide Templates on the Magnetic Properties of Nanoporous Co/Pt and Co/Pd Thin Multilayered Films // T. N. Anh Nguyen, J. Fedotova, J. Kasiuk, V. Bayev, O. Kupreeva, S. Lazarouk, D. H. Manh, D. L. Vu, S. Chung, J. Åkerman, V. Altynov, A. Maximenko // *Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 427. – P. 649–655.

6–А. Механизм формирования трубчатого оксида титана электрохимическим анодированием / С. К. Лазарук, О. В. Купреева, Д. А. Циркунов, Д. А. Сасинович, В. В. Дудич, Г. Г. Рабатуев // *Журнал технической физики*. – 2020. – №5 (90). – С. 746–754.

7–А. Influence of Interfacial Magnetic Ordering and Field-Cooling Effect on Perpendicular Exchange Bias and Magnetoresistance in Nanoporous IrMn/[Co/Pd] Films / W.-B. Wu, J. Kasiuk, T. N. Anh Nguyen, J. Przewoźnik, J. Fedotova, C. Kapusta, O. Kupreeva, S. Lazarouk, K. Tung Do, T. Huong Nguyen, H. Ky Vu, H. Linh Pham, D. Lam Vu, J. Åkerman // *J. Appl. Phys.* – 2020. – Vol. 127. – P. 223904-1–223904-15.

8–А. Correlation of Magnetic and Magnetoresistive Properties of Nanoporous Co/Pd Thin Multilayers Fabricated on Anodized TiO₂ Templates / T. N. Anh Nguyen, J. Kasiuk, W.-B. Wu, J. Fedotova, J. Przewoźnik, C. Kapusta, O. Kupreeva, S. Lazarouk, T. T. Hai Cao, T. T. Thuy Nguyen, H. Manh Dinh,

K. Tung Do, T. Huong Nguyen, H. Ky Vu, D. Lam Vu, J. Akerman // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – P. 10838-1–10838-11.

Статьи в других рецензируемых научных изданиях

9–А. Особенности формирования наноструктурированного оксида титана при пониженной температуре / О. В. Купреева, Д. А. Сасинович, С. К. Лазарук, В. Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2011. – № 3 (57). – С. 29–33.

10–А. Фотокаталитические свойства наноструктурированного диоксида титана / О. В. Купреева, С. К. Лазарук, В. Е. Борисенко, Лиан Кун, Т. Бэнг Канг // Журнал прикладной спектроскопии. – 2012. – № 6 (79). – С. 1010–1013.

11–А. Влияние поверхностной структуры титановых имплантатов на реакцию со стороны костной ткани / С. К. Лазарук, О. В. Купреева, Д. В. Исаев, Ф. А. Горбачев, А. С. Ластовка // Доклады БГУИР. – 2016. – № 1 (95). – С. 100–103.

12–А. Оптические свойства анодного оксида титана и его применение в челюстно-лицевой хирургии / Е. А. Гвоздовская, И. В. Тимошевич, К. А. Корзун, С. К. Лазарук, О. В. Купреева, Д. В. Исаев, Ф. А. Горбачев, А. С. Ластовка // Доклады БГУИР. – 2016. – № 5 (99). – С. 48–53.

13–А. Особенности формирования анодного оксида алюминия с трубчатой структурой / С. К. Лазарук, Д. А. Циркунов, О. В. Купреева, Д. А. Сасинович, Г. Г. Рабатуев // Доклады БГУИР. – 2017. – № 8 (110). – С. 5–12.

14–А. Формирование покрытий с электретыми свойствами на титановых имплантатах / С. И. Багаев, А. Т. Волочко, Г. В. Марков, И. П. Смягликов, А. П. Бурмаков, В. Н. Кулешов, О. В. Купреева, С. К. Лазарук // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. в 3 кн. Кн. 1. Материаловедение ; редкол. А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2017. – С. 12–19.

15–А. Влияние морфологии поверхности титановых имплантатов на реакцию со стороны костной ткани / О. В. Купреева, С. И. Багаев, А. Н. Мазуренко, О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. в 3 кн. Кн. 1. Материаловедение ; редкол. А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2017. – С. 174–178.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

16–А. Особенности структуры пористого анодного оксида титана / С. К. Лазарук, Д. А. Сасинович, О. В. Купреева, Т. И. Ореховская, В. Е. Борисенко // Сб. тр. VII Междунар. конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 28 июня–1 июля 2010 г. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 439–440.

17–А. Nanoporous Titania Electrochemically Formed at Low Temperatures / S. Lazarouk, O. Kupreeva, T. Orekhovskaya, D. Sasinovich, F. Arnaudd'Avitaya. N. Rochidi ; ed. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam // Proceedings of International Conference «Nanomeeting» 24–27 May 2011. – Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – 2011. – P. 444–447.

18–А. Формирование и фотокаталитические свойства наноструктурированного оксида титана в ультрафиолетовом и видимом диапазонах / О. В. Купреева, С.К. Лазарук, В.Е. Борисенко, L. Kun, B. K. Tay // Матер. VIII Междунар. конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 2–5 июля 2012 г. – СПб., 2012. – С. 257–258.

19–А. Double-Walled Titania Nanotubes / O. V. Kupreeva, T. I. Orekhovskaya, V. E. Borisenko, D. Grützmacher, L. Kun, B. K. Tay; ed. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam // Proceedings of International Conference «Nanomeeting» 28–31 May 2013. – Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – 2013. – P. 351–354.

20–А. Формирование двустенных нанотрубок оксида титана с конусовидным верхом / О. В. Купреева, Д. А. Сасинович, Т. И. Ореховская, С. К. Лазарук, В. Б. Высоцкий // Матер. 23-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 8–13 сентября 2013 г. – Севастополь, 2013. – С. 814–815.

21–А. Купреева, О. В. Формирование наноразмерного оксида титана с конусовидной структурой для антиотражающих покрытий / О. В. Купреева, С. К. Лазарук, В. Б. Борисенко // Сб. тр. IX Междунар. конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 7–10 июля 2014 г. – СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2014. – С. 323–324.

22–А. Антибактериальная активность новых наноструктурированных материалов на основе TiO_2 в отношении грамположительной и грамотрицательной микрофлоры в водной среде в условиях эксперимента с фотокаталитической активацией видимым светом / Е. В. Дроздова, Н. В. Дудчик, В. В. Бурая, О. В. Купреева // Здоровье и окружающая среда: сб. науч. тр. / Респ. науч.-практ. центр гигиены ; гл. ред. С. И. Сычик. – Минск : ГУ «РНМБ», 2014. – Т. 1., Вып. 24. – С. 40–44.

23–А. CoPd Antidote Arrays with Perpendicular Magnetic Anisotropy Fabricated on TiO_2/Si Templates / A. Maximenko, J. Fedotova, M. Marzalek, O. Kupreeva, S. Zavadski; ed. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam // Proceedings of International Conference «Nanomeeting» 26–29 May 2015. – Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – 2015. – P. 132–135.

24–А. Nanostructured titania for antireflective coatings / O. Kupreeva, D. Golosov, I. Timoshevich, D. Zhygulin, V. Vysotsky ; ed. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam // Proceedings of

International Conference «Nanomeeting» 26–29 May 2015. – Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – 2015. – P. 381–384.

25–А. Формирование пленок анодного оксида титана и их применение в челюстно-лицевой хирургии / Е. А. Гвоздовская, И. В. Тимошевич, С. К. Лазарук, О. В. Купреева, П. Г. Асинский, Г. Г. Рабатуев, Д. В. Исаев, Ф. А. Горбачев, А. С. Ластовка // Сб. тр. Междунар. конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 7–10 июля 2016 г. – СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. – С. 225–226.

26–А. Использование пленок наноструктурированного оксида титана для антиотражающих покрытий / О. В. Купреева, С. К. Лазарук, С. М. Завадский, Д. А. Голосов // Сб. тр. Междунар. конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 4–7 июля 2016 г. – СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. – С. 229–230.

27–А. Купреева, О. В. Создание наноструктурированных материалов для обеззараживания воды / О. В. Купреева // Матер. VI Респуб. науч. конф. студ., магистрантов и аспирантов. «Актуальные вопросы физики и техники», Гомель, 26 апреля 2017 г. – Гомель : ГГУ имени Ф. Скорины, 2017. – С. 68–71.

28–А. Correlated Evolution of Surface Morphology, Structure and Magnetic Properties of Nanoporous Co/Pd Films with Perpendicular Magnetic Anisotropy / J. Fedotova, J. Kasiuk, V. Baev, O. Kupreeva, T. N. Anh Nguyen, H. M. Do, D. L. Vu ; ed. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam // Proceedings of International Conference «Nanomeeting» 30 May–2 June 2017. – Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – 2017. – P. 333–340.

29–А. Effect of the Surface Structure of Titanium Implants on the Response to the Bone Tissue / S. K. Lazarouk, O. V. Kupreeva, O. N. Dudich, V. L. Krasilnikova, S. I. Bahayeu ; ed. by V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam // Proceedings of International Conference «Nanomeeting» 30 May–2 June 2017. – Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. – 2017. – P. 433–436.

30–А. Effect of Electrolyte Viscosity on Heating of Growing Anodic Oxide During Electrochemical Anodizing / G. Rabatuev, O. Kupreeva, D. Tsirkunov, S. Lazarouk, V. Gritskov, V. Prannik, A. Kurilenko // Proceedings of 17th International Workshop on NDTCS-2017 “New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations”, Minsk, Belarus, 26.10.2017–27.10.2017. – P. 11–13.

31–А. Anodic Titanium Oxide with Controllable Optical Properties for Biomedical Applications / V. Gritskov, E. Gvozdoyskaya, G. Rabatuev, S. Lazarouk, O. Kupreeva, A. Kurilenko, D. Isaev, F. Gorbachev, A. Lastovka, A. Mazurenko // Proceedings of 17th International Workshop on NDTCS–2017 “New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations”, Minsk, Belarus, 26.10.2017–27.10.2017. – P. 16–17.

РЕЗІЮМЭ

Купрэева Вольга Уладзіміраўна

Фармаванне і ўласцівасці нанаструктураваных пластоў аноднага аксідру тытана

Ключавыя словы: электрахімічнае анадаванне, нанаструктураваны аксід тытана, фотакаталіз.

Мэта работы: усталяванне заканамернасцяў фармавання пластоў нанаструктураванага ячэістага і трубчатага аксідру тытана на паверхні плёнак, фальгі і масіўных дэталю з тытана пры іх электрахімічным анодным акісленні і вызначэнне асаблівасцяў іх марфалогіі і ўласцівасцяў, перспектыўных для ўжывання ў прыладах магнітнага запісу інфармацыі і ў сістэмах ачысткі вады.

Метады даследавання: скануючая электронная мікраскапія, прасвечваючая электронная мікраскапія, энергадысперсійная рэнтгенаўская спектраскапія, спектральны аналіз, спектраскапія камбінацыйнага рассеявання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: усталяваны рэжымы электрахімічнага анадавання, якія прыводзяць да утварэння нанаструктураванага аксідру тытана з ячэістай і трубчатой структурамі; усталяваны ўплыў тэрмічнай апрацоўкі на фармаванне аксідру тытана з падвойнымі сценамі трубак; усталявана, што атамы прымесных элементаў у пласце аксідру тытана павялічваюць яго фотакаталітычную актыўнасць; усталявана павелічэнне значэння каэрцытыўнай сілы на 20-25% ферромагнітных плёнак Co/Pd на паверхні формаўтвараючай матрыцы з порыстага аксідру тытана ў параўнанні са структурай на аснове суцэльных пленак з гэтага матэрыялу.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры стварэнні прылад для ачысткі і давычышчэння вады, сістэм візуалізацыі размеркавання магнітных палеў і сэнсараў магнітных тунельных пераходаў, касцяных імплантатаў.

Галіна ўжывання: нанатэхналогіі, медыцына (хірургія), магнітаэлектроніка.

РЕЗЮМЕ

Купреева Ольга Владимировна

Формирование и свойства наноструктурированных слоев анодного оксида титана

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, наноструктурированный оксид титана, фотокатализ.

Цель работы: установление закономерностей формирования слоев наноструктурированного ячеистого и трубчатого оксида титана на поверхности тонких пленок, фольги и массивных образцов из титана при их электрохимическом анодном окислении и определение особенностей их морфологии и свойств, перспективных для применения в устройствах магнитной записи информации и в системах очистки воды от органических загрязнений.

Методы исследования: сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, спектральный анализ, спектроскопия комбинационного рассеяния.

Полученные результаты и их новизна: установлены режимы электрохимического анодирования, приводящие к образованию наноструктурированного оксида титана с ячеистой и трубчатой структурами; установлено влияние термической обработки на формирование оксида титана с двойными стенками трубок; установлено, что атомы примесных элементов в слое оксида титана увеличивают его фотокаталитическую активность; установлено увеличение значения коэрцитивной силы на 20–25 % ферромагнитных пенек Co/Pd на поверхности формозадающей матрицы из пористого оксида титана по сравнению со структурой на основе сплошных пленок из этого материала.

Рекомендации по использованию: полученные результаты могут быть использованы при создании устройств для очистки и доочистки воды, систем визуализации распределения магнитных полей и сенсоров магнитных туннельных переходов, костных имплантатов.

Область применения: нанотехнологии, медицина (хирургия), магнитоэлектроника.

SUMMARY

Kupreeva Olga

Fabrication and properties of nanostructured layers of anodic titanium oxide

Keywords: electrochemical anodization, nanostructured titanium oxide, photocatalysis.

Aim of the work: determination of regularities in the formation of nanostructured honeycomb structured and tubular titanium oxide layers on the surface of titanium films, foils and solid samples during their electrochemical anodic oxidation and determination of their morphological features and properties promising for application in magnetic information recording devices and in water treatment systems for organic impurities.

Research methods: scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, Energy-dispersive X-ray spectroscopy, spectral analysis, Raman spectroscopy.

The results obtained and their novelty: electrochemical anodization regimes leading to the formation of nanostructured titanium oxide with cellular and tubular structure have been established, the influence of thermal treatment on the formation of titanium oxide with double-walled tubes has been established, it has been established that impurity element atoms in titanium oxide layer increase its photocatalytic activity, a 20–25 % increase in the coercive force ferromagnetic Co/Pd films on the surface of the template made of porous titanium oxide in comparison with the structure based on compact films of this material was found.

Recommendations for use: the results obtained can be used to create devices for water treatment and purification, magnetic field distribution visualisation systems and magnetic tunnel transition sensors, bone implants.

Scope: nanotechnology, medicine (surgery), magnetoelectronics.

Научное издание

**Купреева
Ольга Владимировна**

**ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЛОЕВ
АНОДНОГО ОКСИДА ТИТАНА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.16.08 – нанотехнологии и наноматериалы (материалы
для электроники и фотоники)

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч. изд. л. . Тираж . Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,
№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск.