
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

УДК 54.057 + 542.973 + 544.526.2 + 535.243.2

СИНТЕЗ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР TiO₂/Ti

М. А. ЕВСЕЙЧИК¹⁾, Л. С. ХОРОШКО^{1), 2)}, Д. И. ГАГЛОЕВА³⁾,
С. А. ХУБЕЖОВ⁴⁾, А. В. БАГЛОВ^{1), 2)}, И. И. МАКОЕД⁵⁾,
Ш. И. МАМАТКУЛОВ⁶⁾, М. Д. ПЕЧЕРСКАЯ⁶⁾, Д. В. ЯКИМЧУК⁷⁾

¹⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова,
ул. Ватутина, 44–46, 362025, г. Владикавказ, Россия

⁴⁾Центр инноваций и развития
Харбинского инженерного университета, 266000, г. Циндао, Китай

⁵⁾Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина,
буль. Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Беларусь

⁶⁾Институт материаловедения научно-производственного объединения
«Физика – Солнце» Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Чингиза Айтматова, 2б, 100084, г. Ташкент, Узбекистан

⁷⁾Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Методом химического структурирования с последующим отжигом на основе титановой фольги получена гетероструктура TiO₂/Ti с развитой сетчато-игльчатой поверхностью, сформированной квазиупорядочно пересекающимися нанонитями диоксида титана со средней толщиной 55 нм. По результатам рентгеновского

Образец цитирования:

Евсейчик МА, Хорошко ЛС, Гаглоева ДИ, Хубежов СА, Баглов АВ, Макоед ИИ, Маматкулов ШИ, Печерская МД, Якимчук ДВ. Синтез и фотокаталитическая активность гетероструктур TiO₂/Ti. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2024;3:17–24.
EDN: RJKHKS

For citation:

Yauseichyk MA, Khoroshko LS, Gagloeva DI, Khubezhov SA, Baglov AV, Makoev II, Mamatkulov SHI, Pecherskaya MD, Yakimchuk DV. Synthesis and photocatalytic activity of TiO₂/Ti heterostructures. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2024;3:17–24. Russian.
EDN: RJKHKS

Сведения об авторах см. на с. 24.

Information about the authors see p. 24.



дифракционного анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света установлено образование на поверхности титановой фольги после химической и последующей термической обработки тонкого структурированного оксидного слоя, состоящего из смеси полиморфных модификаций TiO_2 – анатаза и рутила, причем анатаз является доминирующей фазой. Фотокаталитическая активность гетероструктуры TiO_2/Ti в отношении модельного загрязнителя метиленового синего в водном растворе при активации УФ-излучением (365 нм) приводит к деградации 9 % красителя в течение 50 мин, что является высоким показателем для тонких пленок. Полученные структурированные фотокаталитически активные слои диоксида титана могут применяться в портативных устройствах очистки воды и воздуха, а также благодаря высокоразвитой поверхности могут стать основой для сенсорных устройств и плазмонных материалов.

Ключевые слова: наноструктуры; диоксид титана; фотокатализ; функциональные наноматериалы.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках проекта Ф23УЗБ-061.

SYNTHESIS AND PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF TiO_2/Ti HETEROSTRUCTURES

M. A. YAUSEICHYK^a, L. S. KHOROSHKO^{a, b}, D. I. GAGLOEVA^c,
S. A. KHUBEZHOV^d, A. V. BAGLOV^{a, b}, I. I. MAKOED^e,
Sh. I. MAMATKULOV^f, M. D. PECHERSKAYA^f, D. V. YAKIMCHUK^g

^aBelarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Browki Street, Minsk 220013, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^cNorth Ossetian State University after K. L. Khetagurova,
44–46 Vatutina Street, Vladikavkaz 362025, Russia

^dInnovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China

^eBrest State A. S. Pushkin University, 21 Kasmanawtaw Boulevard, Brest 224016, Belarus

^fInstitute of Material Science, Scientific Production Association «Physics – Sun»,
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,

2b Chingiz Aytmatov Street, Tashkent 100084, Uzbekistan

^gScientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus
for Materials Science, 19 P. Browki Street, Minsk 220072, Belarus

Corresponding author: A. V. Baglov (baglov@bsu.by)

Abstract. The heterostructure TiO_2/Ti with developed surface based on titanium foil was obtained by the chemical structuring and subsequent annealing. The surface of heterostructure formed by the quasi-ordered massive consists of nanowires with average diameter about 55 nm. According to the results of X-ray diffraction analysis and Raman spectroscopy, the formation of a thin structured oxide layer consisting of a mixture of polymorphic modifications of TiO_2 – anatase and rutile – on the surface was established herewith anatase-dominated. The photocatalytic activity of the heterostructure TiO_2/Ti against the model pollutant methylene blue in aqueous solution under UV-irradiation (365 nm) activation has been established at 9 % in 50 min, which is a good value for thin films. The obtained structured photocatalytically active titanium dioxide layers can be used in portable water and air purification devices and, due to the highly developed surface, become the basis for sensor devices and materials for plasmonics.

Keywords: nanostructures; titanium dioxide; photocatalysis; functional nanomaterials.

Acknowledgements. The studies were supported with the project F23UZB-061.

Введение

Диоксид титана TiO_2 на протяжении многих лет является одним из самых популярных и активно исследуемых материалов для гетерогенного фотокатализа [1–7]. Фотокаталитически активные материалы на основе диоксида титана отличаются сравнительной простотой технологии получения, вариативностью форм-фактора (порошковые и иммобилизованные катализаторы, наноструктурированный диоксид титана в виде нитей, столбиков и т. д.), а также наличием антибактериальной активности [6–8]. Среди полиморфных модификаций TiO_2 наиболее высокую эффективность разложения загрязнителей

демонстрируют анатаз и рутил, характеризующиеся оптической шириной запрещенной зоны 3,0 и 3,2 эВ соответственно [1; 9; 10]. Брукит используется реже ввиду более сложной процедуры синтеза и стабилизации кристаллической фазы [2]. Главными недостатками диоксида титана как типичного широкозонного полупроводника являются его слабая чувствительность к видимому излучению и необходимость активации УФ-излучением. Повышение фотокаталитической активности материалов на основе диоксида титана может осуществляться как с помощью легирования для сенсбилизации к видимому излучению, так и за счет формирования высокоразвитой наноструктурированной поверхности, получение которой возможно химическими методами и сочетанием химических и термических методик.

Целью данной работы является исследование морфологии и фотокаталитической активности тонких слоев диоксида титана, получаемых на титановой фольге, путем сочетания методов химического и термического окисления.

Материалы и методы исследования

Диоксид титана на поверхности титановой фольги ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91) получали двухстадийным методом (рис. 1). На первой стадии предварительно очищенную в 10 % растворе азотной кислоты фольгу термохимически окисляли в кипящем растворе пероксида водорода (30 %) в течение 10 мин, на второй стадии проводили отжиг образцов на воздухе при температуре 550 °С в течение 30 мин.

Морфологию полученных структур исследовали с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе EVO10 (*Carl Zeiss*, Германия). Определение толщин нанонитей осуществляли с использованием программы *ImageJ*, статистический анализ проводили средствами пакета *MS Excel*. Фазовый состав оксидного слоя определяли методом рентгеновской дифракции (РД) на дифрактометре *Maxima_X XRD-7000* (*Shimadzu*, Япония) с источником характеристического рентгеновского излучения CuK_α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Запись данных производили в геометрии Брэгга – Брентано ($\theta - 2\theta$) с шагом $0,01^\circ$ при обзорном исследовании и с шагом $0,005^\circ$ при детальном изучении. Исследования методом рамановской спектроскопии (комбинационного рассеяния света (КРС)) проводили на зондовой нанолaborатории «ИНТЕГРА Спектра» (ООО «НТ-МДТ», Россия) с красным лазерным источником возбуждения ($\lambda = 633 \text{ нм}$, $P = 1 \text{ мВт}$).

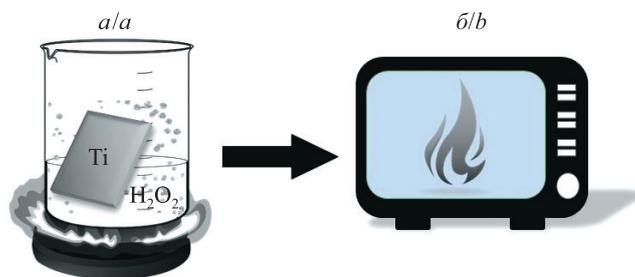


Рис. 1. Схематическое изображение этапов получения образцов TiO_2/Ti :
 а – химическое окисление образца в 30 % растворе пероксида водорода;
 б – термическое окисление на воздухе при 550 °С

Fig. 1. Schematic representation of the stages of obtaining TiO_2/Ti samples:
 а – chemical oxidation of the sample in a 30 % solution of hydrogen peroxide;
 б – thermal oxidation in air at 550 °С

Каталитическую активность структур определяли по изменению концентрации тестового загрязнителя – органического красителя метиленового синего ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$) – после воздействия на него УФ-излучения в присутствии образца TiO_2/Ti и в отсутствие образца TiO_2/Ti . Изменение концентрации оценивали по снижению интенсивности основного пика поглощения метиленового синего в водном растворе, которую определяли с помощью двухлучевого спектрофотометра *Evolution 300 UV-Vis* (*Thermo Electron Scientific Instruments LLC*, США) с разрешением 1 нм. Спектры регистрировали в диапазоне длин волн 400–800 нм со скоростью сканирования 1200 нм/мин. Концентрация красителя в исходном растворе составляла $5 \cdot 10^{-7}$ моль/л, реакционный объем раствора составлял 2 мл. В процессе исследования растворы в кварцевых кюветах помещали под УФ-источник (лампа *Omnilux UV 400W E-40* (Германия), $\lambda = 365 \text{ нм}$), спектры регистрировали каждые 10 мин. Для установления адсорбционного равновесия образцы выдерживали в тестовом растворе при темновом режиме (т. е. в условиях минимизации воздействия оптического излучения) в течение 30 мин.

Результаты и их обсуждение

Сочетание химической и термической обработки способствует более эффективному окислению титана, достаточно устойчивого к внешним воздействиям, за счет термостимулированного формирования поверхностного слоя оксида-дигидроксида титана $\text{TiO}(\text{OH})_2$, который, в свою очередь, при дальнейшей термической обработке разрушается с образованием целевого оксида. На рис. 2, *a–в*, представлены изображения поверхности структуры TiO_2/Ti , полученные СЭМ-методом при различном увеличении. Данные изображения свидетельствуют о выраженном сетчато-игольчатом наноструктурированном рельефе оксидного слоя по всей поверхности образца, при большем увеличении также наблюдается формирование квазипериодической структуры (см. рис. 2, *в*).

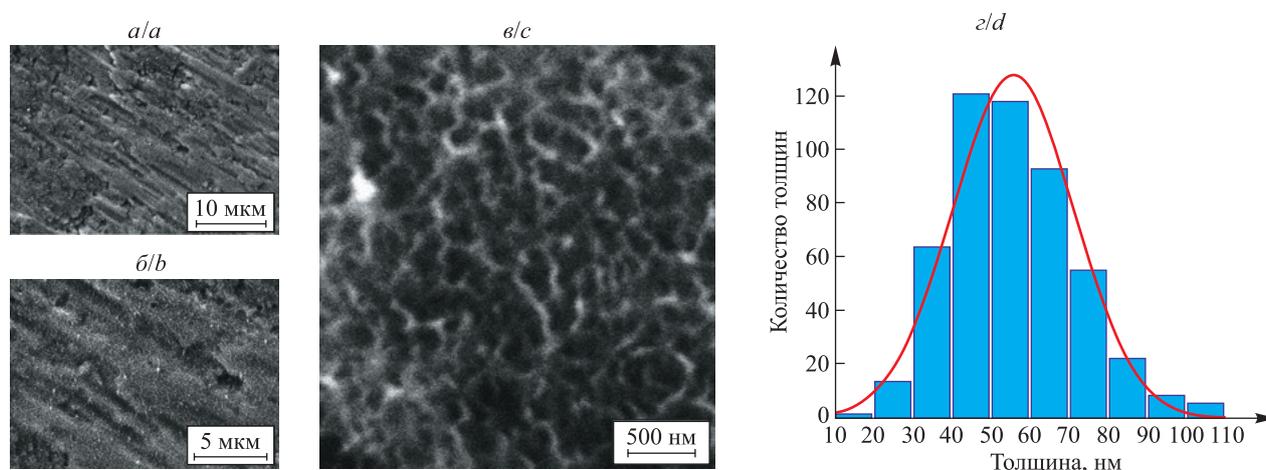
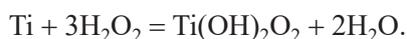


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности TiO_2/Ti , полученные при увеличении $\times 7000$ (*a*), $\times 15\,000$ (*б*) и $\times 65\,000$ (*в*), и распределение толщин нанонитей оксидного слоя на поверхности титана (*г*)

Fig. 2. SEM images of the TiO_2/Ti surface obtained at the magnifications $\times 7000$ (*a*), $\times 15\,000$ (*b*) and $\times 65\,000$ (*c*), and thickness distribution of nanowires of oxide layer on the titanium surface (*d*)

Наблюдаемый развитый поверхностный рельеф, который характеризуется игольчатой морфологией и квазиупорядоченной сетчатой структурой, состоящей из пересекающихся нанонитей, формируется за счет неравномерности диффузионных процессов, свойственной поверхности титановой фольги. Так, для высокочистого (99,99 %) титана и для титановых сплавов, включая используемый в настоящей работе сплав, характерны некоторые особенности начальных стадий термического окисления, проводимого при температурах ниже температур, соответствующих фазовому переходу в самом металле (800–900 °С). При стандартных условиях нагревания титана на воздухе окислительные процессы, приводящие к утолщению оксидного покрытия, начинают протекать при температурах выше 600 °С [11–14]. Слой естественного рентгеноаморфного оксида толщиной несколько нанометров (3 нм), который по соотношению титана и кислорода близок к соотношению титана и кислорода, содержащихся в TiO_2 [11; 15], образуется на поверхности титана при комнатной температуре (20 °С). В случае повышения температуры увеличивается скорость диффузии кислорода в титане, при этом его концентрация растет в основном в приповерхностном слое, сокращаясь на границе раздела оксид – металл, что способствует быстрому торможению и прекращению процесса термического окисления при отсутствии внешних влияющих факторов (дальнейшее повышение температуры или давления кислорода в реакционной камере). Толщины таких слоев не превышают обычно 100–200 нм [12; 14; 16]. Предварительная химическая обработка, включающая насыщение поверхности титана кислородом с образованием аморфных оксидов и гидроксидов, способна увеличить толщину термически окисляемого слоя на поверхности металлического титана в несколько раз. В частности, реакция титана с перекисью водорода начинается уже при комнатной температуре с образованием перекиси-дигидроксида [13]:



В свою очередь, полученное соединение при нагревании разлагается с формированием оксида, а дополнительное окислирование поверхности способствует увеличению толщины образующегося оксида. В нашем эксперименте, исходя из количества раствора (250 мл) и площади фольги ($5 \times 5 \times 2$ см), при температуре около 115 °С и при допущении, что все возможные объемы реагентов вступили в реакцию за указанное время, объем полученной перекиси-гидроксида в пересчете на диоксид титана соответствует

толщине окисленного слоя около 200 нм¹. Кроме того, взаимодействие титана с водным раствором пероксида водорода при повышенной температуре способствует дополнительному формированию на поверхности фольги ряда аморфных оксидных соединений титана Ti_xO_y, которые при дальнейшем отжиге на воздухе доокисляются в устойчивые формы TiO₂, причем различие коэффициентов теплового расширения в ряду оксидов титана приводит к образованию дополнительно развитого рельефа поверхности² [13]. Таким образом, исходя из режимов химического и термического окисления, толщина оксида в рассматриваемом случае не превышает 500 нм, более точная инструментальная оценка толщины слоя TiO₂ на данном этапе не осуществлялась, она является одной из целей дальнейших исследований.

Проведенный статистический анализ толщин нанонитей на случайно выбранных 30 участках фольги размером 15 × 10 мм (количество нанонитей на каждом участке равнялось (500 ± 5) шт.) показал, что толщины подчиняются нормальному закону распределения. Среднее значение толщины нанонитей составляет (55,68 ± 0,96) нм для 95 % доверительного интервала по Стьюденту, медианное значение – (54,06 ± 0,96) нм. Близость среднего и медианного значений толщин нанонитей свидетельствует о хорошей однородности процесса окисления используемой фольги при заданных режимах синтеза и применимости метода двухстадийного химико-термического окисления для получения наноструктурированных пленок TiO₂.

По результатам РД-анализа поверхностный слой структуры TiO₂/Ti состоит из смеси фаз анатаза и рутила (рефлексы в области значений 2θ равны 25° (JCPDS 71-1167) и 27,5° (JCPDS 75-1753) соответственно (вставка на рис. 3, а)). Соотношение пиков, полученных для титановой подложки (см. рис. 3, а, JCPDS 44-1294) и оксидного слоя, также свидетельствует о малой толщине формируемого TiO₂.

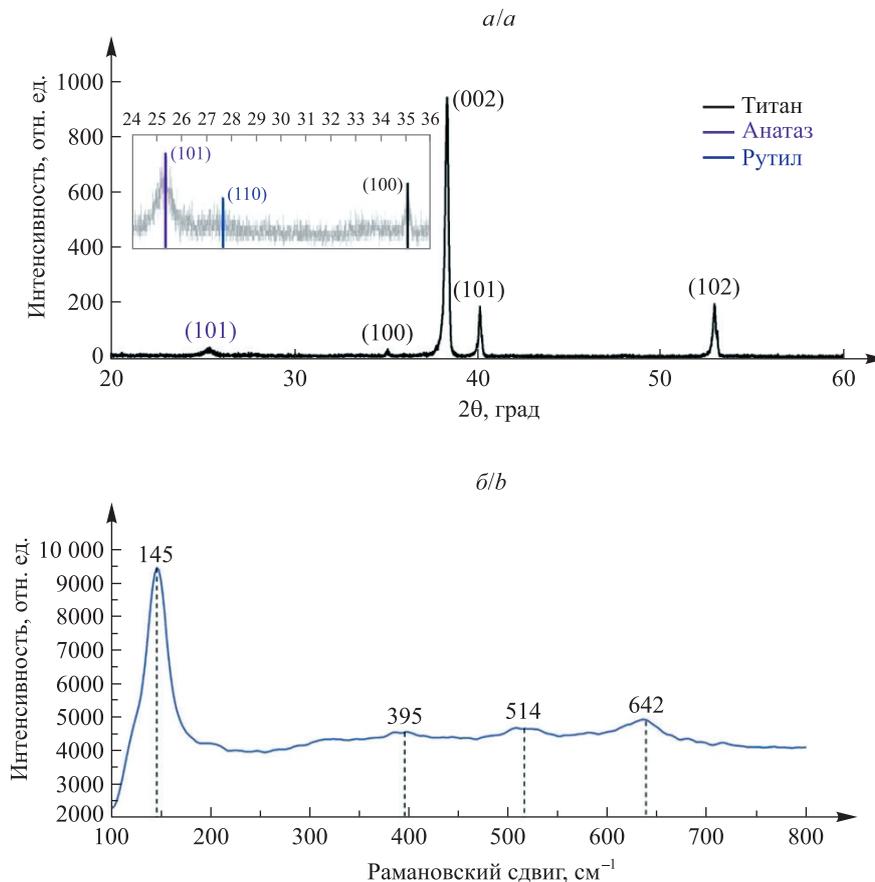


Рис. 3. Дифрактограмма гетероструктуры TiO₂/Ti (на вставке представлена дифрактограмма, полученная с шагом 0,005°) (а) и спектры КРС TiO₂/Ti (б)

Fig. 3. Diffractogram of TiO₂/Ti heterostructure (on the insert, a diffractogram obtained with increments of 0.005° is presented) (a) and Raman spectra of the heterostructure TiO₂/Ti (b)

Учитывая свидетельства низкого количества содержания оксидной фазы на поверхности образца, а также отсутствие на дифрактограмме всех рефлексов анатаза, кроме рефлекса (101), для уточнения фазового состава оксидного слоя и подтверждения наличия именно данной полиморфной модифика-

ции вещества были проведены исследования с применением КРС-спектроскопии (рис. 3, б). В спектре КРС отчетливо видны пики с максимумами 145; 395; 514 и 642 см^{-1} , соответствующие колебательным модам структурной модификации TiO_2 типа анатаза с пространственной группой $I4_1/amd$ [17]. Область 200–400 см^{-1} характеризуется отсутствием колебательных линий с интенсивностью, сопоставимой с вышеуказанными пиками, что свидетельствует об отсутствии в образце фазы брукита. Более того, отсутствие в спектре КРС пиков, связанных со структурой рутила, а также невысокая интенсивность связанных с данной структурой линий на дифрактограмме (см. рис. 3, а) позволяют сделать вывод о значительном преобладании фазы анатаза над фазой рутила в поверхностном слое образца.

Исследование спектров поглощения растворов метиленового синего после УФ-облучения в присутствии гетероструктуры TiO_2/Ti показывает снижение интенсивности максимума основного пика поглощения на длине волны 664 нм, а также выравнивание дополнительного пика на длине волны 615 нм (рис. 4, а), что свидетельствует о деградации красителя в присутствии фотокатализатора в течение времени экспонирования.

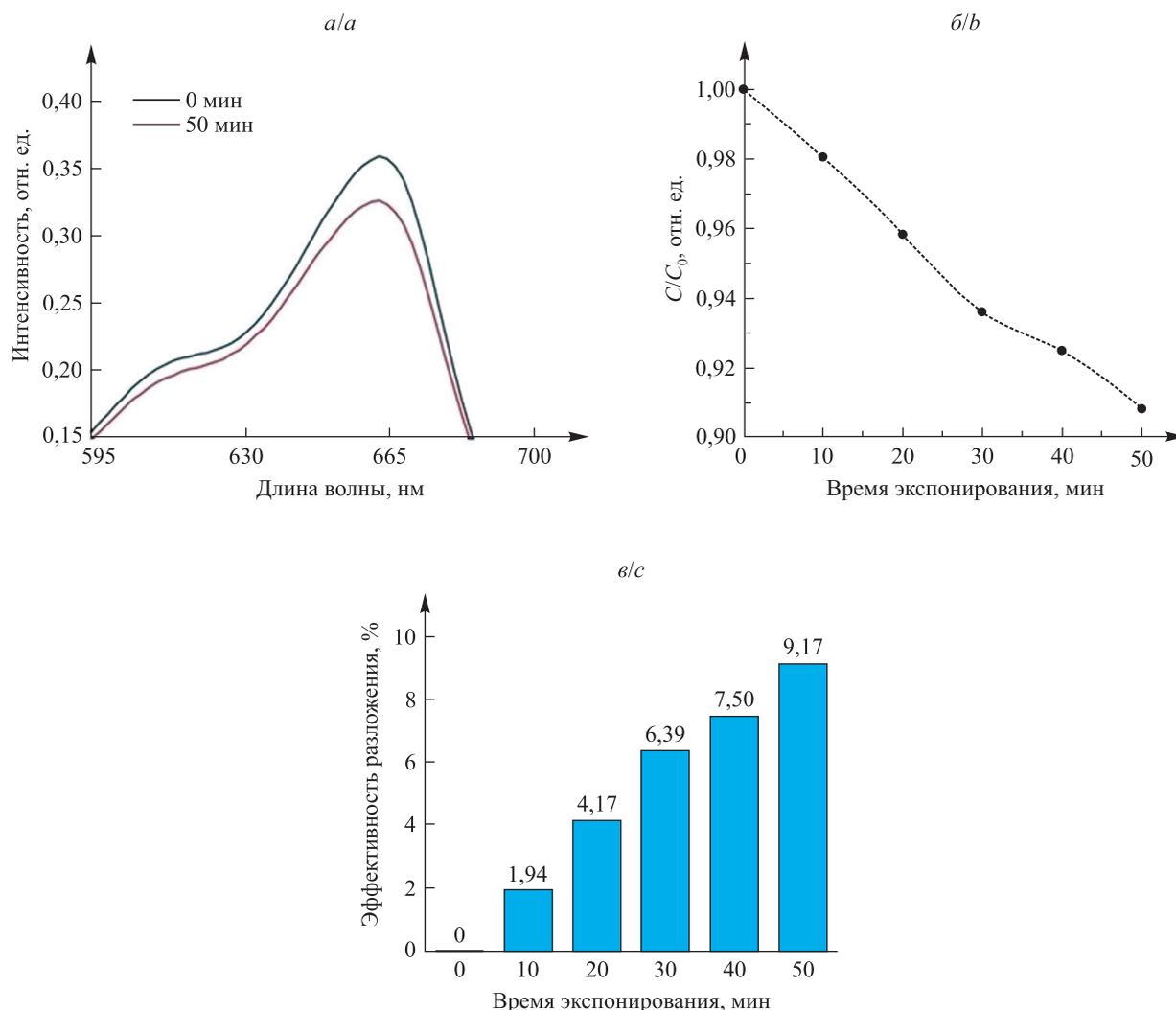


Рис. 4. Эволюция спектров поглощения метиленового синего в водном растворе ($5 \cdot 10^{-7}$ моль/л) под действием УФ ($\lambda = 365$ нм) в присутствии образцов TiO_2/Ti (а); кинетика разложения метиленового синего при экспонировании УФ-излучением ($\lambda = 365$ нм) в присутствии образцов TiO_2/Ti (б); эффективность разложения тестового загрязнителя с течением времени экспонирования (в)

Fig. 4. Evolution of the absorption spectra of methylene blue in the aqueous solution under the UV-irradiation ($\lambda = 365$ nm) in the presence of the TiO_2/Ti samples (a); kinetic of photocatalytic destruction of methylene blue in the aqueous solution under the UV-irradiation ($\lambda = 365$ nm) in the presence of the TiO_2/Ti samples (b); efficiency of decomposition of the test pollutant over the irradiation time (c)

Кроме того, наблюдается смещение максимума поглощения метиленового синего при длительном облучении, что связано с последовательным деметилированием, деаминированием и последующим окислением исходных молекул метиленового синего (более подробно механизм деколоризации (фотодеструкции) метиленового синего описан в [18]). Влияния адсорбции красителя структурой TiO_2/Ti на концентрацию исходного раствора инструментально не зарегистрировано по причине малых толщин оксидного слоя, изменение концентрации красителя после темновой выдержки в течение 10–30 мин не достигало величины более 0,1 %, ввиду чего данные по темновой адсорбции на графиках не приводятся.

За время УФ-облучения структур TiO_2/Ti в течение 50 мин разложению подвергается порядка 9 % красителя (рис. 4, б и в), что в сочетании с малыми значениями площади (64 мм^2) и толщины ($\sim 400\text{--}500 \text{ нм}$) свидетельствует о достаточно высокой фотокаталитической активности исследуемых тонкопленочных образцов, сопоставимой с фотокаталитической активностью пленочных фотокатализаторов, получаемых золь-гель методом [19; 20].

Заключение

Используемое при синтезе структур TiO_2/Ti сочетание химического и термического воздействия позволило сформировать на поверхности титановой фольги слой диоксида титана толщиной до 500 нм, характеризующийся высокой степенью неоднородности и комбинированным фазовым составом, что подтверждается результатами РД-анализа и КРС-спектроскопии. Полученная двухстадийным химико-термическим окислением гетероструктура TiO_2/Ti имеет развитый рельеф поверхности, представляющий собой квазиупорядоченную сетчатую структуру с характерными размерами нанонитей около 55 нм. Гетероструктуры демонстрируют высокую фотокаталитическую активность в отношении тестового загрязнителя – органического красителя метиленового синего в водном растворе. Через 50 мин экспонирования УФ-излучением ($\lambda = 365 \text{ нм}$) раствора метиленового синего (исходная концентрация красителя $5 \cdot 10^{-7}$ моль/л) в присутствии структуры TiO_2/Ti отмечается снижение концентрации красителя по сравнению с исходным раствором на 9 %. Полученные структуры TiO_2/Ti могут быть интересны для создания не только эффективных тонкопленочных фотокатализаторов, включая системы для проточных реакторов и портативных устройств, но и приложений плазмоники, поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии, а также систем мониторинга концентраций молекул и протекания химических реакций [21–23]. Задачей дальнейших исследований является создание на основе TiO_2/Ti гетероструктур, содержащих оксидные и металлические наночастицы, способствующие сенсбилизации структур к излучению видимого диапазона.

Библиографические ссылки

1. Leong S, Razmjou A, Wang K, Hapgood K, Zhang X, Wang H. TiO_2 based photocatalytic membranes: a review. *Journal of Membrane Science*. 2014;472:167–184. DOI: j.memsci.2014.08.016.
2. Žerjav G, Žižek K, Zavašnik J, Pintar A. Brookite vs rutile vs anatase: what's behind their various photocatalytic activities? *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(3):107722. DOI: j.jece.2022.107722.
3. Pelaez M, Nolan NT, Pillai SC, Seery MK, Falaras P, Kontos AG, et al. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2012;125:331–349. DOI: j.apcatb.2012.05.036.
4. Verma V, Al-Dossari M, Singh J, Rawat M, Kordy MGM, Shaban M. A review on green synthesis of TiO_2 NPs: photocatalysis and antimicrobial applications. *Polymers*. 2022;14(7):1444. DOI: polym14071444.
5. Kumar SG, Devi LG. Review on modified TiO_2 photocatalysis under UV/visible light: selected results and related mechanisms on interfacial charge carrier transfer dynamics. *Journal of Physical Chemistry A*. 2011;115(46):13211–13241. DOI: jp204364a.
6. Schneider J, Matsuoka M, Takeuchi M, Zhang J, Horiuchi Y, Anpo M, et al. Understanding TiO_2 photocatalysis: mechanisms and materials. *Chemical Reviews*. 2014;114(19):9919–9986. DOI: cr5001892.
7. Yadav S, Jaiswar G. Review on undoped/doped TiO_2 nanomaterial; synthesis and photocatalytic and antimicrobial activity. *Journal of the Chinese Chemical Society*. 2016;1:103–116. DOI: 10.1002/jccs.201600735.
8. Baglov AV, Shevtsova TA, Khoroshko LS, Dudchik NV, Drozdova AV, Borisenko VE. Forming immobilized nanostructured titanium dioxide having antibacterial properties. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2019;63(2):157–163. Russian. DOI: 1561-8323-2019-63-2-157-163.
9. Lan Y, Lu Y, Ren Z. Mini review on photocatalysis of titanium dioxide nanoparticles and their solar applications. *Nano Energy*. 2013;2(5):1031–1045. DOI: j.nanoen.2013.04.
10. Ohtani B, Prieto-Mahoney OO, Li D, Abe R. What is Degussa (Evonik) P25? Crystalline composition analysis, reconstruction from isolated pure particles and photocatalytic activity test. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2010;216(2–3):179–182. DOI: j.jphotochem.2010.07.024.
11. Кубашевский О, Гопкинс БЭ. *Окисление металлов и сплавов*. Алексеева ВА, переводчик. Москва: Металлургия; 1965. 428 с.
12. Vaquira I, Vergara LI, Passeggi MCG, Vidal RA, Ferron J. Chemical reactions at surfaces: titanium oxidation. *Surface and Coatings Technology*. 1999;122(1):67–71. DOI: 10.1016/s0257-8972(99)00420-x.
13. Лучинский ГП. *Химия титана*. Москва: Химия; 1971. 471 с.

14. Войтович РФ, Головки ЭИ. *Высокотемпературное окисление титана и его сплавов*. Киев: Наукова думка; 1984. 256 с.
15. Korshunov AV, Il'in AP, Lotkov AI, Ratochka IV, Morozova TP, Lykova ON. Features of oxidation of submicrocrystalline titanium when heated in air. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011;319(3):10–16. Russian.
16. Bertrand G, Jarraya K, Chaix JM. Morphology of oxide scales formed on titanium. *Oxidation of Metals*. 1984;21(1–2):1–19. DOI: 10.1007/bf00659464.
17. Li G-G, Ishigaki T, Sun X. Anatase, brookite, and rutile nanocrystals via redox reactions under mild hydrothermal conditions: phase-selective synthesis and physicochemical properties. *Journal of Physical Chemistry C*. 2007;111(13):4969–4976. DOI: 10.1021/jp0673258.
18. Azmat R, Saeed A. Catalytic degradation of methylene blue by nanostructured CrO(OH) prepared by hydrothermal method. *European Chemical Bulletin*. 2014;3(5):417–421. DOI: 10.17628/ECB.2014.3.417.
19. Baglov AV, Denisov NM, Borisenko VE, Uglov VV, Malashevich AA. Photocatalytic activity of nanostructured titania coatings on aluminum substrates. *Inorganic Materials*. 2017;53:1180–1184. DOI: 10.1134/S0020168517110036.
20. Khoroshko L, Borisenko V, Baltrukovich P, Nurmonov S, Ruzimuradov O. One-step sol-gel fabrication of TiO₂/(CuO+Cu₂O) photocatalysts. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2023;108:320–324. DOI: 10.1007/s10971-022-05906-w.
21. Baglov AV, Radionov AA, Chubenko EB, Zaycev VA, Borisenko VE. Installation for photocatalytic water purification from organic pollution in the flow reactor. *Doklady BGUIR*. 2018;(4):45–50. Russian.
22. Gavrilov DA, Leus AV, Gavrilova TS. Application of portable Raman spectrometer in security systems. *T-Comm*. 2011;1:35–37. Russian.
23. Zalduendo MM, Oestreicher V, Langer J, Liz-Marzán LM, Angelomé PC. Monitoring chemical reactions with SERS-active Ag-loaded mesoporous TiO₂ films. *Analytical Chemistry*. 2020;92(20):13656–13660. DOI: 10.1021/acs.analchem.0c03310.

Получена 16.04.2024 / исправлена 18.06.2024 / принята 22.06.2024.
Received 16.04.2024 / revised 18.06.2024 / accepted 22.06.2024.

Авторы:

Мария Александровна Евсейчик – младший научный сотрудник центра 4.11 «Наноэлектроника и новые материалы» научно-исследовательской части, ассистент кафедры физики факультета компьютерных систем и сетей.

Людмила Сергеевна Хорошко – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры микро- и наноэлектроники факультета радиотехники и электроники¹), ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории энергоэффективных материалов и технологий физического факультета²).

Диана Ивановна Гаглоева – инженер центра коллективного пользования «Физика и технологии наноструктур».

Сослан Арсенович Хубежов – кандидат физико-математических наук; научный сотрудник.

Алексей Викторович Баглов – научный сотрудник центра 4.11 «Наноэлектроника и новые материалы» научно-исследовательской части¹), старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории энергоэффективных материалов и технологий физического факультета²).

Игорь Иванович Макоед – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры общей и теоретической физики физико-математического факультета.

Шавкат Исроилович Маматкулов – доктор физико-математических наук; заведующий лабораторией многофункциональных материалов.

Мария Дмитриевна Печерская – младший научный сотрудник лаборатории многофункциональных материалов.

Дмитрий Владимирович Якимчук – кандидат физико-математических наук, доцент; старший научный сотрудник.

Authors:

Maryia A. Yauseichyk, junior researcher at the centre 4.11 «Nanoelectronics and advanced materials» of R & D department, assistant at the department of physics, faculty of computer systems and networks.

m.yauseichyk@gmail.com

Liudmila S. Khoroshko, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of micro- and nanoelectronics, faculty of radioengineering and electronics^a, and leading researcher at the laboratory of energy efficient materials and technologies, faculty of physics^b.

l.s.khoroshko@yandex.by

Diana I. Gagloeva, engineer at the centre for collective use «Physics and technologies of nanostructures».

artemidiana@yandex.ru

Soslan A. Khubezhov, PhD (physics and mathematics); researcher.

soslan.khubezhov@gmail.com

Aleksey V. Baglov, researcher at the centre 4.11 «Nanoelectronics and advanced materials» of R & D department^a, senior researcher at the laboratory of energy efficient materials and technologies, faculty of physics^b.

baglov@bsu.by

Igor I. Makoed, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of general and theoretical physics, faculty of physics and mathematics.

igmak2010@yandex.by

Shavkat I. Mamatkulov, doctor of science (physics and mathematics); head of the laboratory of multifunctional materials.

sh.mamatkulov@imssolar.uz

Mariya D. Pecherskaya, junior researcher at the laboratory of multifunctional materials.

mariya.pecherskaya@yahoo.com

Dmitry V. Yakimchuk, PhD (physics and mathematics), docent; senior researcher.

dim2yakim@gmail.com