

Научная статья

УДК 54-31:546.655/814

doi: 10.17223/24135542/29/9

Оптические свойства и фотокаталитическая активность тонкопленочной гетероструктуры $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$

**Дарья Максимовна Скрылева¹, Ольга Сергеевна Халипова²,
Светлана Анатольевна Кузнецова³**

*^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия*

¹ scrdasha@yandex.ru

² chalipova@mail.ru

³ onm@chem.tsu.ru

Аннотация. Известно, что утилизация сточных вод без надлежащей очистки создает экологические проблемы. Перспективным является фотокаталитическое разложение органических загрязнителей в сточных водах. Этот метод привлек внимание ученых своей простотой и дешевизной. В качестве фотокатализаторов используются в основном порошкообразные полупроводниковые оксидные материалы, обладающие хорошими адсорбционными свойствами по отношению к органическим веществам, фотохимической стабильностью и нетоксичностью. Такие свойства имеют оксиды олова(IV), титана(IV), цинка(II) и церия(IV). В последнее время показана возможность применения в качестве фотокатализаторов тонкопленочных материалов, которые упрощают технологию их удаления из очищенной воды. Кроме того, известно, что гетероструктуры усиливают фотокаталитическую активность материала, в том числе и за счет уменьшения ширины запрещенной зоны, что позволяет больше поглощать веществам в видимой области спектра.

В данной работе проведено сравнение оптических свойств тонкопленочных материалов SnO_2 , CeO_2 и $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ на кварцевых подложках, полученных золь-гель методом из пленкообразующих растворов на основе нитрата церия(III) или/и хлорида олова(IV) с салициловой кислотой. Толщина, показатель преломления пленок изучены методом эллипсометрии, пропускающая способность исследована спектрофотометрией. Фотокаталитические свойства тонкопленочных материалов $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ показаны в модельной реакции разложения органического красителя метиленового синего под УФ-излучением (312 нм) при дневном свете и в темноте. Установлено, что пленки с гетероструктурой $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ толщиной 124 нм, показателем преломления 1,33 и значением коэффициента пропускания более 70% в диапазоне длин волн 440–1 000 нм поглощают в видимой области спектра больше, чем тонкопленочные материалы SnO_2 и CeO_2 . Фотокаталитическая активность пленок $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ под УФ-воздействием при дневном освещении выше, чем их фотокаталитическая активность под УФ-воздействием в темноте. При дневном освещении под УФ-облучением метиленового синего разлагается за одно и то же время в 1,2 раза больше, чем под УФ-излучением в темноте.

Ключевые слова: оксид церия(IV), оксид олова(IV), пленки, гетероструктура, фотокатализатор

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Скрылева Д.М., Халипова О.С., Кузнецова С.А. Оптические свойства и фотокаталитическая активность тонкопленочной гетероструктуры $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2023. № 29. С. 93–103. doi: 10.17223/24135542/29/9

Original article
doi: 10.17223/24135542/29/9

Optical properties and photocatalytic activity of the $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ thin-film heterostructure

Daria M. Skryleva¹, Olga S. Khalipova², Svetlana A. Kuznetsova³

^{1, 2, 3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ scrdasha@yandex.ru

² chalipova@mail.ru

³ onm@chem.tsu.ru

Abstract. It is known that the disposal of wastewater without proper treatment creates environmental problems. One of its solutions is the photocatalytic decomposition of organic pollutants in wastewater. This method attracted the attention of scientists for its simplicity and low cost. As photocatalysts, mainly powdered semiconductor oxide materials are used, which have good adsorption properties with respect to organic substances, photochemical stability and non-toxicity. Such properties are possessed by oxides of tin (IV), titanium (IV), zinc (II) and cerium (IV). Recently, the possibility of using thin-film materials as photocatalysts has been shown, which simplifies the technology of their removal from purified water. In addition, it is known that heterostructures enhance the photocatalytic activity of the material, including by reducing the band gap, which makes it possible for substances to absorb more in the visible region of the spectrum.

In this work, we compared the optical properties of thin-film materials SnO_2 , CeO_2 , and $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ on quartz substrates obtained by the sol-gel method from film-forming solutions based on cerium(III) nitrate or tin(IV) chloride with salicylic acid. The thickness and refractive index of the films were studied by ellipsometry, the transmittance was studied by spectrophotometry. The photocatalytic properties of $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ thin-film materials are shown in a model reaction of the decomposition of the organic dye methylene blue under UV radiation (312 nm) in daylight and in the dark. It has been found that films with $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ heterostructure 124 nm thick, a refractive index of 1.33, and a transmittance of more than 70% in the wavelength range of 440–1000 nm absorb more in the visible spectral region than SnO_2 and CeO_2 thin-film materials. The photocatalytic activity of $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ films under UV exposure in daylight is higher than their photocatalytic activity under UV exposure in the dark. Methylene blue decomposes 1.2 times more in the same time under UV irradiation in daylight than its decomposition under UV irradiation in the dark.

Keywords: cerium(IV) oxide, tin(IV) oxide, films, heterostructure, photocatalyst

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Skryleva, D.M., Khalipova, O.S., Kuznetsova, S.A. Optical properties and photocatalytic activity of the $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ thin-film heterostructure. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2023, 29, 93–103. doi: 10.17223/24135542/29/9

Введение

Одной из важнейших задач, стоящих перед учеными, является очистка сточных вод промышленных предприятий, содержащих токсичные загрязнители, например органические красители. В настоящее время широко применяется фотокаталитическая очистка сточных вод. Используемые порошковые фотокатализаторы, представляющие собой полупроводниковые оксиды, такие как TiO_2 , SnO_2 , ZnO , проявляют фотокаталитическую активность при УФ-облучении. Так как УФ-излучение составляет менее 5% от всего излучения солнечного света, это делает неэффективным использование подобных катализаторов при естественном дневном освещении. Именно поэтому требуется разработка новых составов фотокаталитически активных материалов, позволяющих использовать более широкий диапазон солнечного излучения.

Из трех вышеуказанных оксидов наибольший интерес представляет SnO_2 [1–3]. Оксид олова(IV) является химически стабильным, нетоксичным полупроводником n -типа с шириной запрещенной зоны 2,5–3,7 эВ [1, 2, 4]. Повысить фотокаталитическую активность материалов на основе SnO_2 и эффективность использования солнечной энергии в фотокатализе возможно за счет создания гетероструктур SnO_2 с другими полупроводниковыми соединениями [1]. Таким соединением может выступать диоксид церия, который также обладает свойствами фотокатализатора [5–7] благодаря тому, что является полупроводником n -типа с шириной запрещенной зоны 2,8–4,9 эВ [2, 5, 7]. Этот оксид характеризуется кислородной нестехиометрией и «легкостью» перехода между окисленной и восстановленной формами церия ($\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$). Так, в работе [8] показано, что степень разложения 2-нитрофенола с использованием в качестве фотокатализатора гетероструктур $\text{SnO}_2/\text{CeO}_2$ достигает 80% за 4 ч, тогда как использование индивидуальных оксидов позволяет разложить за аналогичный период времени не более 75% загрязнителя. Увеличение фотокаталитической активности композитов $\text{SnO}_2/\text{CeO}_2$ по сравнению с индивидуальными оксидами также отмечено в работе [9], где показано, что использование композита позволяет за 90 мин достигнуть 90%-ного разложения органического красителя метиленового синего под действием УФ-облучения. Авторами работы [10] установлено, что порошковые фотокатализаторы $\text{SnO}_2/\text{CeO}_2$ с содержанием 7 мас. % диоксида церия проявляют фотокаталитическую активность в реакции разложения красителя прямого черного 38 под действием солнечного излучения. При этом достигается 60%-ное разложение образца за 240 мин. Для удаления порошковых фотокатализаторов из очищаемых растворов необходимо проведение таких операций, как центрифугирование и фильтрация, что усложняет применение данных материалов на реальных объектах. Поэтому интерес представляет

создание фотокаталитически активных материалов в виде тонкопленочных соединений на прозрачных носителях, что позволит упростить технологию фотокаталитической очистки сточных вод.

Данная работа посвящена изучению фотокаталитической активности тонкопленочных гетероструктур $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ на кварцевых подложках в реакции разложения органического красителя метиленового синего.

Экспериментальная часть

Тонкопленочные гетероструктуры $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ были получены путем послойного нанесения пленок CeO_2 и SnO_2 на кварцевую подложку размером $1,0 \times 2,5 \pm 0,2$ см. Пленки CeO_2 и SnO_2 были получены из пленкообразующих растворов (ПОР) на основе нитрата церия(III) (чистота реагента 99,9 мас. %) и хлорида олова(IV) (чистота реагента 99,9 мас. %) соответственно с добавкой салициловой кислоты (чистота реагента 99,9 мас. %) в качестве органического лиганда при соотношении $M:L = 1:1$. Концентрация растворов составляла 0,3 моль/л. В качестве растворителя использовали этиловый спирт (96 мас. %). Методика приготовления ПОР была предложена нами ранее и описана в работах [11, 12]. ПОР выдерживали в течении трех дней при комнатной температуре и затем наносили на кварцевую подложку методом вытягивания со скоростью 3 мм/мин. После процедуры вытягивания подложку с нанесенным слоем ПОР сушили в сушильном шкафу при температуре 60°C в течение 1 ч и затем отжигали 1 ч в муфельной печи при температуре 500°C . Скорость нагрева муфельной печи составляла $14^\circ/\text{мин}$. Ранее было показано, что термическая деструкция ПОР на основе салициловой кислоты, нитрата церия(III) и хлорида олова(IV) приводит к образованию соответственно диоксида церия и диоксида олова [11]. Таким образом был получен образец, представляющий собой кварцевую подложку с нанесенным с двух сторон первым слоем CeO_2 и вторым слоем SnO_2 , который был обозначен как $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$. Для сравнения были получены однослойные пленки оксида церия(IV) и оксида олова(IV) на кварцевых подложках.

Толщину (d) и показатель преломления (n) пленок оценивали методом эллипсометрии, проводя измерения на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3М. Пропускание и поглощение пленок исследовали на спектрофотометре ПЭ-5400УФ в диапазоне длин волн 220–1 000 нм. Ширину запрещенной зоны определяли с применением функции $(\alpha \cdot hv)^2 = A^2(hv - \Delta E_g)$ [13].

Фотокаталитическую активность полученных материалов исследовали на модельной реакции разложения органического красителя метиленового синего (МС). Образец размером $1,0 \times 2,5 \pm 0,2$ см помещали в кварцевый стакан с 25 мл водного раствора МС с концентрацией 2,5 мг/л. Реакционный сосуд выдерживали в темноте в течение 1 ч для достижения адсорбционного равновесия. После этого раствор МС с образцом $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ облучали УФ-излучением, используя эксилампу I_2 ($\lambda_{\text{max}} = 312$ нм) (Россия) в темноте и при комнатном освещении. В ходе облучения через каждые 10 мин отбирали аликваты раствора МС и определяли интенсивность их поглощения в диапазоне

длин волн 500–800 нм, применяя спектрофотометр ПЭ-5400УФ. По интенсивности максимума поглощения МС при $\lambda = 664$ нм оценивали его содержание в отобранных аликвотах.

Результаты и их обсуждение

Методом эллипсометрии установлено, что пленки гетероструктуры $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ на кварцевых подложках образуются толщиной 124 ± 2 нм с показателем преломления $1,33 \pm 0,04$. Полученные образцы $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ характеризуются пропусканием более 70% при длинах волн от 440 до 1 000 нм, что сопоставимо с пропусканием пленок CeO_2 и SnO_2 , полученных в аналогичных условиях (рис. 1, а).

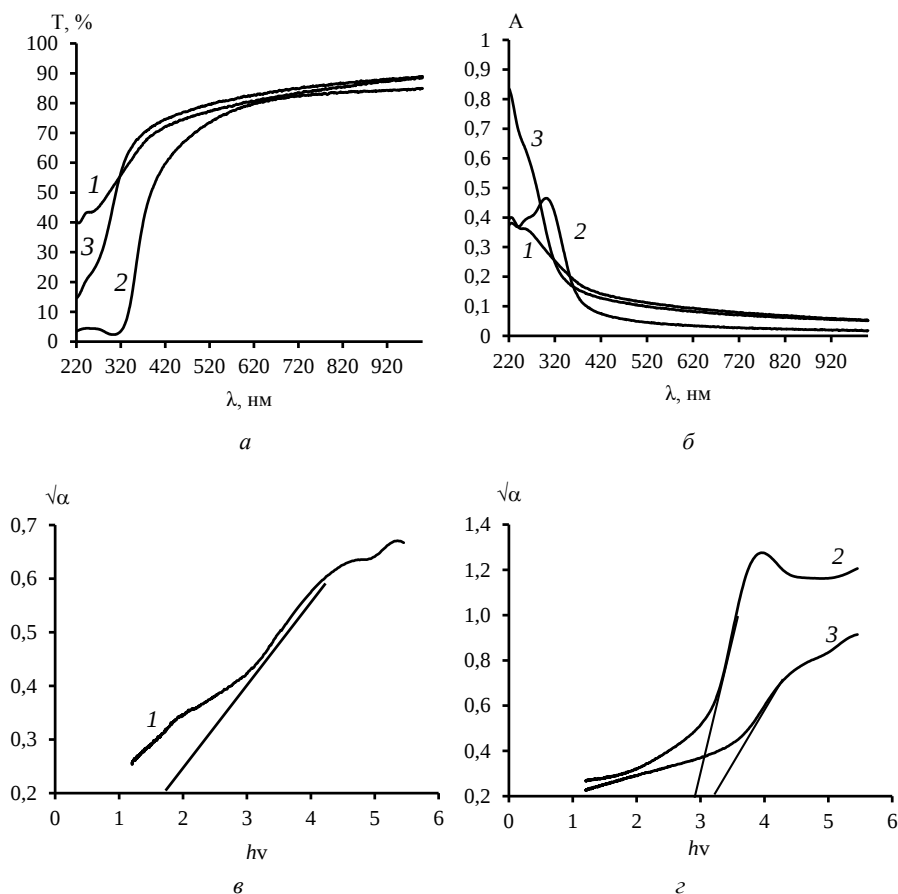


Рис.1. Оптические свойства пленок:
 1 – пленка $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$; 2 – пленка CeO_2 ; 3 – пленка SnO_2 ;
 а – спектры пропускания пленок; б – спектры поглощения пленок;
 в, г – кривые зависимости $\sqrt{\alpha}$ от $h\nu$ для исследуемых образцов

Как видно из спектров поглощения исследуемых образцов (рис. 1, б), наибольшим поглощением в УФ-области характеризуется пленка SnO_2 . Для пленок CeO_2 и $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ наблюдается увеличение поглощения в видимой области спектра по сравнению с пленкой SnO_2 . Как видно из графика зависимости $\sqrt{\alpha}$ от $h\nu$, значение ширины запрещенной зоны зависит от состава образцов (рис. 1, в, г). Значения оптической ширины запрещенной зоны для пленок CeO_2 и SnO_2 составляют 2,9 и 3,2 эВ соответственно, а для образца $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ – 1,7 эВ.

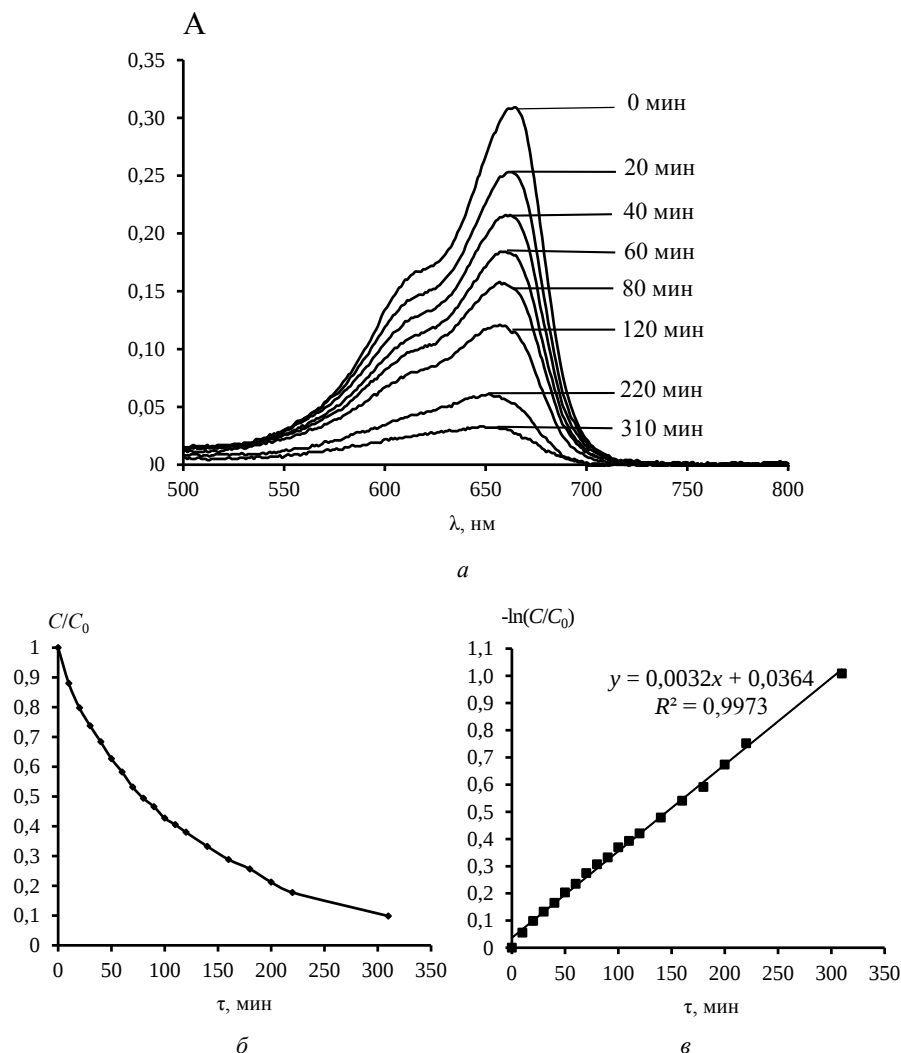


Рис. 2. Результаты исследования фотокаталитической активности пленок $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ в реакции разложения МС под воздействием УФ-облучения при комнатном освещении: а – спектры поглощения раствора МС; б, в – кинетика окисления МС

Результаты исследования фотокаталитической активности образцов $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ в модельной реакции разложения МС под воздействием УФ-облучения (312 нм) при комнатном освещении представлены на рис. 2. Установлено, что выдерживание пленки в растворе МС в темноте приводит к сорбции красителя на поверхности образца. Адсорбционно-десорбционное равновесие достигается в течение 60 мин, при этом сорбция МС на поверхности образца $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ составляет 8%. Как видно из рис. 2, максимальный пик поглощения МС при 664 нм постепенно уменьшается при увеличении времени УФ-облучения реакционной смеси.

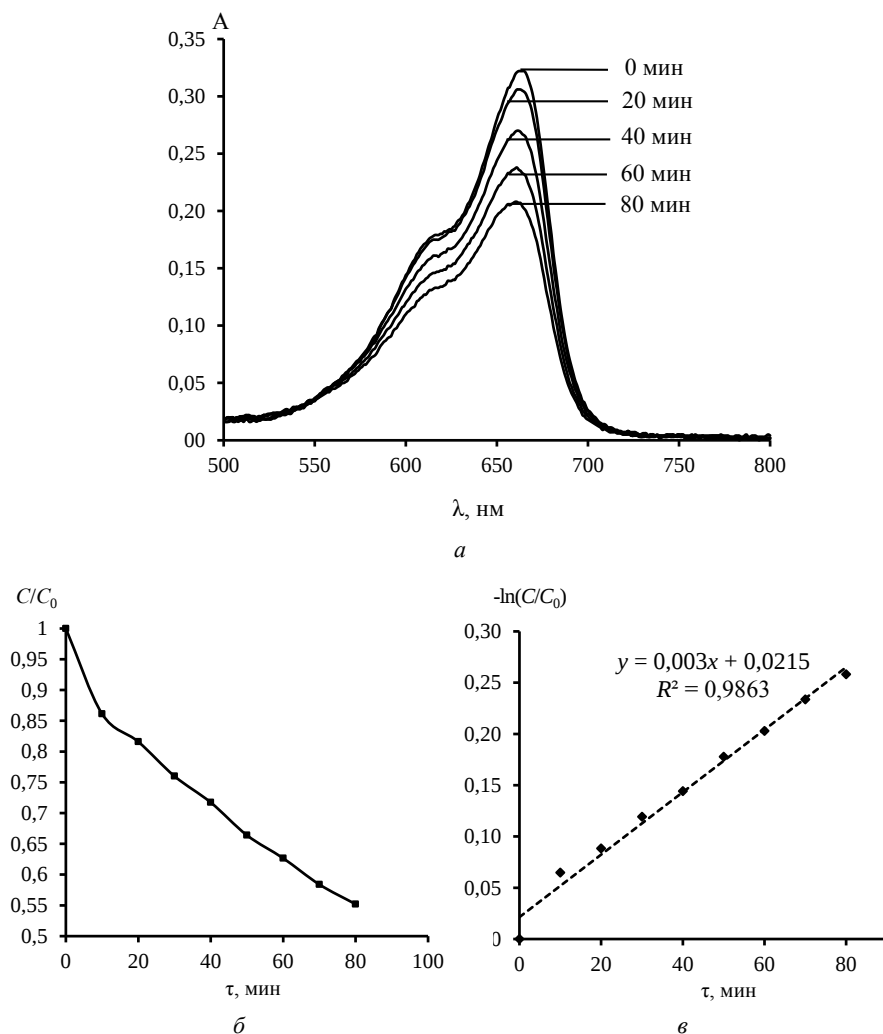


Рис. 3. Результаты исследования фотокаталитической активности образцов $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ в реакции разложения МС под воздействием УФ-облучения в темноте: а – спектры поглощения раствора МС; б, в – кинетика окисления МС

Ранее нами показано, что МС при отсутствии фотокатализатора незначительно подвергается разложению [14]. Степень разложения МС под воздействием УФ-облучения с длиной волны 312 нм в течение 120 мин достигает 14 мас. %. Степень разложения МС в присутствии фотокатализатора при этих же условиях достигает 61 мас. % (см. рис. 2, а). Почти полное разложение МС достигается за 310 мин (степень разложения составляет 90 мас. %).

Обработка результатов исследования фотокаталитической активности тонкопленочных материалов показала, что реакция фоторазложения МС подчиняется кинетике первого порядка (см. рис. 2, б), а выражение скорости определяется формулой $\ln(C_0/C_\tau) = kt$, где C_0 – начальная концентрация красителя МС; C_τ – концентрация в момент времени τ ; k – константа скорости первого порядка. Установлено, что разложение МС на образце $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ под воздействием УФ-облучения при комнатном освещении характеризуется константой скорости $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$.

Результаты исследования фотокаталитической активности образцов $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ в модельной реакции разложения МС под воздействием УФ-облучения в темноте представлены на рис. 3. Установлено, что константа скорости фотокаталитической реакции разложения МС под УФ-облучением в темноте составляет $3 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, что немного меньше константы скорости этой реакции, проводимой при комнатном освещении. Степень разложения МС в присутствии фотокатализатора под воздействием УФ-облучения на свету (см. рис. 2) больше, чем в темноте (см. рис. 3). Так, например, в течение 60 мин при проведении фотокатализа в темноте происходит разложение 37% МС, тогда как при комнатном освещении разлагается 43% МС. Это свидетельствует о том, что МС разлагается в том числе под действием видимого света.

Выводы

Таким образом, в данной работе показано, что тонкопленочные гетероструктуры $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$, которые характеризуются толщиной 124 нм, показателем преломления 1,33 и значением коэффициента пропускания более 70% в диапазоне длин волн 440–1 000 нм обладают фотокаталитической активностью. Образование гетероструктуры $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ позволяет снизить ширину запрещенной зоны до 1,7 эВ по сравнению с шириной запрещенной зоны пленок CeO_2 (2,9 эВ) и SnO_2 (3,2 эВ) и повысить поглощение в видимой области спектра.

Пленки с гетероструктурой $\text{CeO}_2/\text{SnO}_2$ показали более высокую фотокаталитическую активность в реакции разложения органического красителя МС под воздействием УФ-облучения при комнатном освещении, нежели в темноте. Установлено, что значение константы скорости реакции фоторазложения МС на исследуемых тонкопленочных образцах составляет $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, что сопоставимо со значениями скоростей реакций разложения органических красителей на порошковых фотокатализаторах ($3,3 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ [15] и $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ [10]).

Список источников

1. Rajput R.B., Kale R.B. Hydro/solvothermally synthesized visible light driven modified SnO₂ heterostructure as a photocatalyst for water remediation: A review // *Environmental Advances*. 2021. № 5. Art. 100081.
2. Gnanasekarana L., Hemamalini R., Saravananb R., Ravichandran K., Gracia F., Agarwal S., Vinod K.G. Synthesis and characterization of metal oxides (CeO₂, CuO, NiO, Mn₃O₄, SnO₂ and ZnO) nanoparticles as photo catalysts for degradation of textile dyes // *Journal of Photochemistry & Photobiology B: Biology*. 2017. № 173. P. 43–49.
3. Abdullah M., Hamdia A., Rinnerb U., Sillanpää M. Tin dioxide as a photocatalyst for water treatment : a review // *Process Safety and Environmental Protection*. 2017. № 107. P. 190–205.
4. Pawar M., Sengoğdular T., Gouma P. A brief overview of TiO₂ photocatalyst for organic dye remediation: case study of reaction mechanisms involved in Ce–TiO₂ photocatalysts system // *Hindawi Journal of Nanomaterials*. 2018. Art. 5953609.
5. Farghali A.A., Waleed M.A., Hamdedein E.-R.A. Effect of hydrothermal conditions on microstructures of pure and doped CeO₂ nanoparticles and their photocatalytic activity: degradation mechanism and pathway of methylene blue dye // *Res Chem Intermed*. 2017. № 43. P. 7171–7192.
6. Duyen P.H. Tran, Minh-Thuan Pham, Xuan-Thanh Bui, Ya-Fen Wang, Sheng-Jie You. CeO₂ as a photocatalytic material for CO₂ conversion : a review // *Solar Energy*. 2022. № 240. P. 443–466.
7. Fauzi A.A., Jalil A.A., Hassan N.S., Aziz F.F.A., Azami M.S., Hussain I., Saravanan R., Vo D.-V.N. A critical review on relationship of CeO₂-based photocatalyst towards mechanistic degradation of organic pollutant // *Chemosphere*. 2022. № 286. Art. 131651.
8. Pouredala H.R.; Tofangsazib Z.; Keshavarza M.H. Photocatalytic activity of mixture of ZrO₂/SnO₂, ZrO₂/CeO₂ and SnO₂/CeO₂ nanoparticles // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. № 513. P. 359–364.
9. Manibalan G., Murugadoss G., Thangamuthu R., Kumar R.M., Jayavel R., Kumar M.R. Enhanced photocatalytic performance of heterostructure CeO₂–SnO₂ nanocomposite via hydrothermal route // *Materials Research Express*. 2016. № 6. Art. 075032.
10. Foletto E.L., Battiston S., Collazzo G.C., Bassaco M.M., Mazutti M.A. Degradation of leather dye using CeO₂–SnO₂ nanocomposite as photocatalyst under sunlight // *Water Air Soil Pollut*. 2012. № 223. P. 5773–5779.
11. Khalipova O.S., Kuznetsova S.A. Synthesis and properties of CeO₂–SnO₂ films // *Journal of Inorganic Chemistry*. 2013. Vol. 8, № 58. P. 892–897.
12. Khalipova O.S., Kuznetsova S.A., Kozik V.V. Composition and properties of CeO₂–SiO₂ composite films prepared from film-forming solution // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014. Vol. 59, № 9. P. 913–917.
13. Зайцев В.Б., Константинова Е.А., Дейген Д.М., Румянцева М.Н., Подолько Е.В., Пустовалов М.В., Кашкаров П.К. Оптоэлектронные свойства легированного азотом и углеродом нанокристаллического диоксида титана // *Вестник Московского университета. Физика. Астрономия*. 2013. № 5. С. 49–57.
14. Kuznetsova S.A., Khalipova O.S., Lisitsa K.V., Selunina L.A., Khasanov V.V., Malchik A.G., Chen Y.-W. Hollow Spherical Hierarchical MoO₃/SiO₂–TiO₂ Structures for Photocatalytic Decomposition of Organic Pollutant in Water // *Applied Materials Today*. 2022. № 29. Art. 101655.
15. Mazloom J., Zamani H. Photocatalytic and photo-induced disinfection activities of sol-gel synthesized CeO₂–SnO₂:TM (TM = Co, Ni and Mn) nanocomposites: Relation between physical properties and their performance // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. № 754. P. 238–246.

References

1. Rajput R.B., Kale R.B. Hydro/solvothermally synthesized visible light driven modified SnO₂ heterostructure as a photocatalyst for water remediation: A review. *Environmental Advances*. 2021. № 5. Art. 100081.
2. Gnanasekarana L., Hemamalinia R., Saravananb R., Ravichandranc K., Graciab F., Agarwald S., Vinod K.G. Synthesis and characterization of metal oxides (CeO₂, CuO, NiO, Mn₃O₄, SnO₂ and ZnO) nanoparticles as photo catalysts for degradation of textile dyes. *Journal of Photochemistry & Photobiology B: Biology*. 2017. № 173. P. 43–49.
3. Abdullah M., Hamdia A., Rinnerb U., Sillanpää M. Tin dioxide as a photocatalyst for water treatment: A review. *Process safety and environmental protection*. 2017. № 107. P. 190–205.
4. Pawar M., Sengođdular T., Gouma P. A brief overview of TiO₂ photocatalyst for organic dye remediation: case study of reaction mechanisms involved in Ce–TiO₂ photocatalysts system. *Hindawi Journal of Nanomaterials*. 2018. Art. 5953609.
5. Farghali A.A., Waleed M.A., Hamdedein E.-R.A. Effect of hydrothermal conditions on microstructures of pure and doped CeO₂ nanoparticles and their photocatalytic activity: degradation mechanism and pathway of methylene blue dye. *Res Chem Intermed*. 2017. № 43. P. 7171–7192.
6. Duyen P.H. Tran, Minh-Thuan Pham, Xuan-Thanh Bui, Ya-Fen Wang, Sheng-Jie You. CeO₂ as a photocatalytic material for CO₂ conversion: A review. *Solar Energy*. 2022. № 240. P. 443–466.
7. Fauzi A.A., Jalil A.A., Hassan N.S., Aziz F.F.A., Azami M.S., Hussain I., Saravanan R., Vo D.-V.N. A critical review on relationship of CeO₂–based photocatalyst towards mechanistic degradation of organic pollutant. *Chemosphere*. 2022. № 286. Art. 131651.
8. Pourtedala H.R., Tofangsazib Z., Keshavarza M.H. Photocatalytic activity of mixture of ZrO₂/SnO₂, ZrO₂/CeO₂ and SnO₂/CeO₂ nanoparticles. *Journal of alloys and compounds*. 2012. № 513. P. 359–364.
9. Manibalan G., Murugadoss G., Thangamuthu R., Kumar R.M., Jayavel R., Kumar M.R. Enhanced photocatalytic performance of heterostructure CeO₂–SnO₂ nanocomposite via hydrothermal route. *Materials Research Express*. 2016. № 6. Art. 075032.
10. Foletto E.L., Battiston S., Collazzo G.C., Bassaco M.M., Mazutti M.A. Degradation of leather dye using CeO₂–SnO₂ nanocomposite as photocatalyst under sunlight. *Water Air Soil Pollut*. 2012. № 223. P. 5773–5779.
11. Khalipova O.S., Kuznetsova S.A. Synthesis and properties of CeO₂–SnO₂ films. *Journal of Inorganic Chemistry*. 2013. Vol. 8, № 58. P. 892–897.
12. Khalipova O.S., Kuznetsova S.A., Kozik V.V. Composition and properties of CeO₂–SiO₂ composite films prepared from film-forming solution. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014. Vol. 59, № 9. P. 913–917.
13. Zajcev V.B., Konstantinova E.A., Dejgen D.M., Romyanceva M.N., Podol'ko E.V., Pustovalov M.V., Kashkarov P.K. Optoelektronnye svoystva legirovannogo azotom i uglerodom nanokristallicheskogo dioksida titana [Optoelectronic properties of nitrogen and carbon doped nanocrystalline titanium dioxide]. *Bulletin of Moscow University. Physics. Astronomy*. 2013. № 5. P. 49–57.
14. Kuznetsova S.A., Khalipova O.S., Lisitsa K.V., Selunina L.A., Khasanov V.V., Malchik A.G., Chen Y.-W. Hollow Spherical Hierarchical MoO₃/SiO₂–TiO₂ Structures for Photocatalytic Decomposition of Organic Pollutant in Water. *Applied Materials Today*. 2022. № 29. Art. 101655.
15. Mazloom J., Zamani H. Photocatalytic and photo-induced disinfection activities of sol-gel synthesized CeO₂–SnO₂:TM (TM = Co, Ni and Mn) nanocomposites: Relation between physical properties and their performance. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. № 754. P. 238–246.

Сведения об авторах:

Скрылева Дарья Максимовна – студент химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: scredasha@yandex.ru

Халипова Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры неорганической химии Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: chalipova@mail.ru

Кузнецова Светлана Анатольевна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры неорганической химии Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: onm@chem.tsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Skryleva Daria M. – Student of the Faculty of Chemistry, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: scredasha@yandex.ru

Khalipova Olga S. – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Department of Chemistry, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: chalipova@mail.ru

Kuznetsova Svetlana A. – Candidate of Chemical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Chemistry, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: onm@chem.tsu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.11.2022; принята к публикации 09.02.2023

The article was submitted 20.11.2022; accepted for publication 09.02.2023