

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Ti/TiO₂/Ag

М.А. Евсейчик¹⁾, А.Д. Сонных²⁾, Ш.И. Маматкулов³⁾,
О. Галкина⁴⁾, А.В. Баглов^{1), 5)}, Л.С. Хорошко^{1), 5)}

¹⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки 6, Минск 220013, Беларусь,
m.yauseichyk@gmail.com, baglov@bsuir.by, l_khoroshko@bsuir.by

²⁾НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки 19, Минск 220072, Беларусь, *alex.sonnykh@gmail.com*

³⁾Физико-технический институт им. С.А. Азимова
Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Ч. Айтматова 2Б, Ташкент 100084, Узбекистан, *sh.mamatkulov@imssolar.uz*

⁴⁾Институт материаловедения Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Ч. Айтматова 2Б, Ташкент 100084, Узбекистан, *helga93rr@mail.ru*

⁵⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь

На основе фотокаталитически активных тонких слоев диоксида титана на титановой фольге золь-гель методом синтезированы гетероструктуры с наночастицами серебра Ti/TiO₂/Ag. Полученные гетероструктуры под действием УФ-излучения (365 нм) демонстрируют фотокаталитическую активность в отношении тестового загрязнителя – органического красителя Родамина Б в водном растворе (5 мг/л), при этом наличие наночастиц увеличивает степень разложения красителя. Плазмонный эффект, присущий используемым наночастицам, делает гетероструктуры Ti/TiO₂/Ag перспективными для практических приложений в виде экологичной фотокаталитической очистки воды от органических загрязнителей и высокочувствительной поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии молекул аналитов.

Ключевые слова: гетероструктуры; УФ-излучение; диоксид титана; наночастицы серебра; фотокатализ.

PHOTOCATALYTIC ACTIVE HETEROSTRUCTURES Ti/TiO₂/Ag

M.A. Yauseichyk¹⁾, A.D. Sonnykh²⁾, Sh.I. Mamatkulov³⁾,
O. Galkina⁴⁾, A.V. Baglov^{1), 5)}, L.S. Khoroshko^{1), 5)}

¹⁾Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Browka Str., 220013 Minsk, Belarus,
m.yauseichyk@gmail.com, baglov@bsuir.by, l_khoroshko@bsuir.by

²⁾Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials
Science, 19 P. Browka Str., 220072 Minsk, Belarus, *alex.sonnykh@gmail.com*

³⁾S.A. Azimov Physical-Technical Institute of Uzbekistan Academy of Sciences,
2b Chingiz Aytmatov Str., 100084 Tashkent, Uzbekistan, *sh.mamatkulov@imssolar.uz*

⁴⁾Institute of Materials Science, Uzbekistan Academy of Sciences,
2b Chingiz Aytmatov Str., 100084 Tashkent, Uzbekistan, *helga93rr@mail.ru*

⁵⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus

Photocatalytically active titanium dioxide thin layers (400-500 nm of thickness) were obtained on titanium foil by chemical and thermal oxidation. Heterostructures with silver nanoparticles were synthesized on the Ti/TiO₂ surfaces by the sol-gel method. Silver sols were prepared based on the process of reduction and stabilization of silver nitrate (AgNO₃) with sodium citrate (NaCHO₃) under the thermostating (200-300 °C). Then sol was dropped onto the surface and dried at the room temperature for 12 h. The resulting heterostructures Ti/TiO₂/Ag exhibit enhanced photocatalytic activity towards the test pollutant, the organic dye Rhodamine B in an aqueous solution (5 mg/l), under the UV irradiation activation (365 nm). The plasmonic effect inherent in the investigated nanoparticles makes the Ti/TiO₂/Ag heterostructures promising for different applications. Particularly, in the form of environmentally friendly photocata-

lytic water purification from organic pollutants and highly sensitive surface-enhanced Raman spectroscopy of analyte molecules.

Keywords: heterostructures; UV radiation; titanium dioxide; silver nanoparticles; photocatalysis.

Введение

Использование ультрафиолетового (УФ) излучения для активации или ускорения протекания физико-химических процессов находит применение во многих отраслях. Среди фотоактивируемых процессов особое внимание уделяется каталитическим процессам, применяемым, в том числе, для синтеза водорода и очистки воды и воздуха [1-3].

Наиболее известным и распространенным среди УФ-активируемых фотокатализаторов является диоксид титана (TiO_2), проявляющий также антибактериальную активность [3, 4]. Интерес к фотокатализаторам, активируемым видимым диапазоном оптического излучения, также достаточно высок ввиду возможности использования таких материалов для очистки воды в условиях солнечного освещения, что особенно актуально для стран с высоким уровнем инсоляции, а также в целом для разработки самоочищающихся поверхностей.

С целью повышения фотокаталитической эффективности под воздействием солнечного света поверхность пленок TiO_2 модифицируют наноструктурами благородных металлов (серебро, золото и др.), как альтернатива благородным металлам также используются медь, цинк кобальт, углерод и др., в том числе, в виде оксидов. При использовании металлических наночастиц серебра, золота и меди поверхность пленки приобретает дополнительно плазмонные свойства, что позволяет формировать multifunctional покрытия.

В данной работе рассмотрены фотокаталитические свойства структур диоксида титана, модифицированных серебром, при УФ-активации.

Материалы и методы

Для получения гетероструктур в качестве основы использовали диоксид титана (толщина 400-500 нм), сформированный

на титановой фольге химическим и термическим окислением, как описано в работе [5]. Наночастицы серебра на поверхности подложек Ti/TiO_2 получали золь-гель методом из золь, приготовленных по методике, адаптированной из [6]. Готовый золь капельно наносили на подложки диоксида титана и сушили на воздухе при комнатной температуре в течение 12 ч. Наличие металлического серебра при формировании покрытия из используемого золя на оксидных структурах ранее подтверждено результатами спектроскопии комбинационного рассеяния света [7].

Фотокаталитическую активность гетероструктур исследовали в отношении тестового красителя Родамина Б в водном растворе (5 мг/л) при активации УФ-излучением (365 нм, 9 Вт). Снижение концентрации красителя определяли по изменению поглощения растворов до и после экспонирования УФ в присутствии гетероструктур, как подробно описано в [3]. Для достижения адсорбционного равновесия перед экспонированием гетероструктуры выдерживали в растворе красителя в темновом режиме в течение 20 мин. Спектры поглощения растворов регистрировали при помощи спектрофотометра MC 122 (UV-VIS-NIR спектрофотометр, SOL Instruments, РБ) при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

По истечении 60 мин экспонирования в растворе фотокаталитической деструкции в присутствии исследуемых гетероструктур подвергается до 30 % красителя по сравнению с исходной концентрацией (рис. 1).

По результатам ранее проведенных исследований, структуры, использованные в качестве подложек, сами по себе обладают фотокаталитической активностью [5], прибавление наночастиц серебра улучшает степень деструкции красителя. Ма-

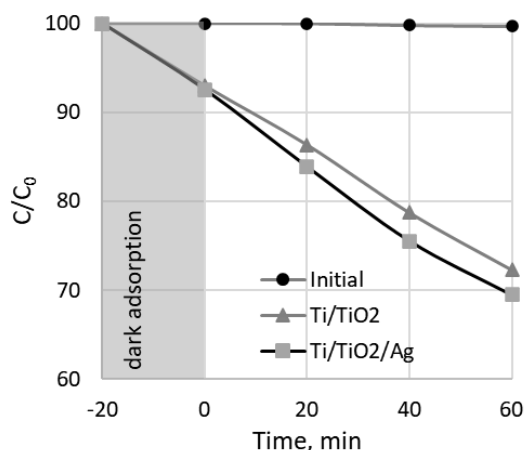


Рис. 1. Изменение концентрации красителя Родамина Б относительно исходной в растворе при УФ-экспонировании в присутствии гетероструктуры Ti/TiO₂/Ag

лый процент усиления фотокаталитической активности может объясняться несколькими факторами, в частности, тенденцией к агрегации частиц при синтезе из золя, а также небольшой концентрацией частиц на поверхности при выбранном методе синтеза, при этом такие наночастицы обладают регистрируемой плазмонной активностью в отношении красителя метиленового синего при концентрации до 10⁻⁶ М [7].

Заключение

Золь-гель методом на поверхности диоксида титана, полученного химико-термическим окислением, сформированы наночастицы серебра. Синтезированные гетероструктуры Ti/TiO₂/Ag под воздействием УФ-излучения демонстрируют фотокаталитическую активность в водном растворе в отношении органического красителя Родамина Б. За 60 мин деструкции подвергается до 30 % красителя, что является высоким показателем для тонкопленочных образцов. Исследованная ранее

плазмонная активность синтезируемых наночастиц делает гетероструктуры Ti/TiO₂/Ag перспективными для мультифункциональных применений, таких как мониторинг химических реакций и сенсорные системы.

Библиографические ссылки

1. Paiu M., Lutić D., Favier L., Gavrilescu M. Heterogeneous Photocatalysis for Advanced Water Treatment: Materials, Mechanisms, Reactor Configurations, and Emerging Applications. *Appl. Sci.* 2025; 15: 5681.
2. Bratovčić A., Tomašić V. Hydrogen Production Through Newly Developed Photocatalytic Nanostructures and Composite Materials. *Processes.* 2025; (13): 1813.
3. Khoroshko L., Baglov A., Yauseichyk M., Nurmanov S., Ruzimuradov O. TiO₂-Based Heterostructure Coatings for Photocatalytic Water Purification. Titanium Dioxide-Based Multifunctional Hybrid Nanomaterials. Engineering Materials (Ed. by Prakash J., Cho J., Ruzimuradov O., Fang D.). Cham: Springer, 2025. 113-134.
4. Alisiyonak O., Lavitskaya A., Khoroshko L., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M., Korolkov I. et al. Breathable Films with Self-Cleaning and Antibacterial Surfaces Based on TiO₂-Functionalized PET Membranes. *Membranes.* 2023; (13): 733.
5. Евсейчик М.А., Хорошко Л.С., Гаглоева Д.И., Хубежов С.А., Баглов А.В., Макоед И.И. и др. Синтез и фотокаталитическая активность гетероструктур TiO₂/Ti. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2024; (3): 17-24.
6. Богачева Н.В., Тарбеева К.А., Огородова Н.Ю., Хасаншин З.Р., Чернядьев А.В., Тунева Н.А. Способ получения наночастиц серебра размером 30±3 нм. Патент RU2729991C1. Оpubл. 13.08.2020 г.
7. Евсейчик М.А., Жигулин Д.В., Сонных А.Д., Якимчук Д.В. Получение гетероструктур на основе высокоупорядоченного Al₂O₃ и металлических наночастиц. В кн.: Федосюк В.М. и др. ред. Сборник докладов XI Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела» (19-23 мая 2025 г.), г. Минск. Минск: ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 2025. С. 437-440.