

Конденсированные среды и межфазные границы

<https://journals.vsu.ru/kcmf/>

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 54-44

Научная специальность ВАК – 1.4.1. Неорганическая химия

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12806>

Структуры для фотокатализа на основе ZnO с наночастицами Ag

Д. Г. Радайкин[✉], В. А. Мошников

ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина),
ул. Профессора Попова, дом 5 литер Ф, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация

Аннотация

Цель статьи: Наночастицы серебра являются перспективным компонентом для улучшения каталитических характеристик полупроводниковых материалов за счет эффекта плазмоники. Целью данной работы установление закономерностей влияния осажденного серебра на каталитическую активность оксида цинка.

Экспериментальная часть: Проведен синтез образцов с различным содержанием серебра от 0.2 до 2 мас. %. Для характеристики поверхности образцов были получены СЭМ снимки и АСМ сканы порошков. Для анализа состава были получены EDX спектры и элементное картирование. В результате было подтверждено равномерное осаждение серебра на поверхности оксида цинка и соответствие расчетного состава с полученным. Активность катализатора оценивали по степени деградации органического красителя Родамина 6G.

Выводы: Проанализирован эффект осажденного серебра на поверхность ZnO. При осаждении 0.2 мас. % серебра активность возрастает на 58 %, а при добавлении 2 мас. % приводит к росту активности на 92 %. Согласно полученным данным, было установлено положительное влияние осажденного серебра на фотокаталитическую активность оксида цинка. Зависимость изменения активности от количества серебра выходит на насыщение при достижении 2 мас. % серебра.

Ключевые слова: оксид цинка, наночастицы серебра, фотокатализ, гетеропереход, экология

Для цитирования: Радайкин Д. Г., Мошников В. А. Структуры для фотокатализа на основе ZnO с наночастицами Ag. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(2): 293–301. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12806>

For citation: Radaykin D. G., Moshnikov V. A. Structures for photocatalysis based on ZnO with Ag nanoparticles. Condensed Matter and Interphases. 2025;27(2): 293–301. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12806>

[✉] Радайкин Дмитрий Геннадьевич, e-mail: dima19980219@gmail.com

© Радайкин Д. Г., Мошников В. А., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Среди глобальных вопросов, стоящих перед человечеством, первостепенными являются вопросы экологии и энергетики. Уровень потребления ресурсов и энергии, а соответственно и отходов, растет огромными темпами. Существенный процент сбрасываемых отходов составляют синтетические красители, антибиотики и микрочастицы пластика, которые представляют собой токсичные вещества, опасные для флоры и фауны. Они оказывают негативный эффект на водную среду, уменьшая уровень кислорода в ней, и приводят к генетическим мутациям из-за своих канцерогенных свойств. В связи с этим остро стоит задача по ихнейтрализации. Для очистки сточных вод используются различные методы, такие как биологическая и физико-химическая обработка. Однако из-за токсичности и сложной молекулярной структуры загрязнителей требуется современные и высокоеффективные методы очистки, такие как фотокатализ.

Фотокатализ, благодаря своей способности работать в условиях зеленой энергии, является одним из ключевых направлений в области восстановления окружающей среды. На данный момент проделан значительный объем работ по проектированию и разработке фотокатализаторов для таких применений, как деградация и трансформация опасных органических веществ, генерация водорода, а также восстановление CO_2 и NO_x [1, 2].

Фактором, снижающим фотокаталитическую активность, является рекомбинация электронно-дырочных пар (экситонов). Эффективным методом является создание интерфейса на границе двух материалов с различной шириной запрещенной зоны, что позволяет получить гетеропереход и пространственно разделять фотогенерированные заряды за счет внутреннего электрического поля. Это приводит к увеличению времени жизни экситонов [3]. Различные типы гетеропереходов, такие как барьер Шоттки [4], гетеропереходы с p - n переходом (или изотипные) [5], Ван-дер-Ваальсовы [6] и фасетные гетеропереходы [7] проектируются и исследуются в зависимости от конкретных целей для их применения. Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки, поэтому правильный выбор гетероперехода имеет важное значение. В современном нанофотокатализе находят широкое применение полупроводниковые материалы, особенно оксиды металлов [8], перовскиты [9], халькогениды [10], а также иерархические

структуры: металлогорганические каркасы (MOF) [11], ковалентные органические каркасы (COF) [12] и MXenes [13].

Наноархитектоника является передовым направлением в области дизайна новых материалов, в том числе и гетероструктур. В рамках данной концепции рассматриваются следующие подходы, такие как атомно-молекулярный дизайн, нетрадиционные механизмы роста, включая ориентированное сращивание и образование мезокристаллов, использование коллоидных квантовых точек для расширения оптического диапазона чувствительности пористых иерархических структур и золь-гель технологии для получения новых наноструктурированных материалов с необходимыми свойствами [14-16].

Оксид цинка среди полупроводниковых материалов выделяется сильной окислительной способностью, отличными оптоэлектронными и каталитическими свойствами, высокой химической стабильностью, нетоксичностью и низкой стоимостью [17, 18]. Наночастицы ZnO, являющиеся, как правило, полупроводниками n -типа, имеют ширину запрещенной зоны 3.37 эВ и множество активных каталитических центров. Однако фотокаталитическая активность материала ограничивается способностью поглощать электромагнитное излучение. Свойства данного материала имеют сильную зависимость от структуры собственных точечных дефектов, эта особенность привела к разработкам различных методик по модификации поверхности образцов ZnO [19-20]. Например, при помощи механической активации, облучением электронным лучом или отжигом возможно достичь изменения концентраций вакансий кислорода на поверхности материала, появления новых адсорбционных центров и изменения типа проводимости [21, 22].

Модифицирование ZnO металлическими элементами, такими как Au, Ag и Cu, может привести к улучшению фотокаталитических характеристик материала за счет изменения в зонной структуре и наличию плазмонного эффекта. Наночастицы серебра являются наиболее интересными среди других наночастиц металлов. Они привлекли внимание из-за их уникальной электропроводности, химической стабильности, каталитической и противомикробной активности [23]. Создание композитов на основе ZnO с добавлением Ag приводит к изменению свойств полупроводникового материала. Они выступают в качестве модификатора реакцион-

ных центров и также служат катализатором разложения загрязняющих веществ [24]. Металлические островки на поверхности ZnO захватывают фотоиндуцированные носители зарядов и усиливают поглощение света, при этом оба эффекта ускоряют окислительно-восстановительные реакции и усиливают фотокаталитическую эффективность материала [25–27].

Анализируя работы в данном направлении, можно отметить, что осаждение и внедрение наночастиц благородных металлов являются перспективными способами усиления фотокаталитической активности материала. Так, в работе [28] для синтеза образцов ZnO, содержащих серебро, использовался метод соосаждения. Образцы обладали мелкой дисперсностью и имели вид хлопьев. Исследование активности проводили при помощи метилового синего. В результате добавление серебра привело к росту активности с 87.7 до 97.7 % при повышении концентрации серебра до 1 мас. % при прочих равных условиях исследования активности катализатора. В исследовании [29] использовался метод фотоосаждения для получения оксида цинка с серебряными наночастицами на поверхности. Наличие серебра привело к положительному влиянию на характеристики образцов. Было отмечено, что повышение количества серебра до 1 мас. % приводит к заметному росту фотокаталитической активности, но при этом дальнейшее повышение количества серебра ведет к понижению активности. Объясняется это блокировкой активных центров оксида цинка.

В ходе данной работы были получены образцы ZnO-Ag с различной массовой долей серебра методом химического восстановления наночастиц серебра. Данный метод является простым для получения композита оксида цинка с серебром.

2. Экспериментальная часть

2.1. Методика синтеза

В качестве основы композита был использован коммерческий порошок ZnO ГОСТ 10262-73, «чистый» согласно химической классификации. Содержание основного вещества не менее 99 %. Удельная поверхность 8–10 м²/грамм.

Для установления корреляции между составом композита ZnO-Ag и изменением его активности были синтезированы образцы с различной массовой долей серебра. Композиты были получены путем восстановления серебра из соли AgNO₃ при помощи NaBH₄ на поверхности ZnO

в присутствии стабилизатора поливинилпирролидона (PVP) по следующей методике:

1) навеску ZnO диспергировали в дистиллированной воде на УЗ-ванне в течение нескольких минут;

2) AgNO₃ предварительно растворяли в небольшом количестве дистиллированной воды при помощи УЗ-ванны;

3) полученный раствор AgNO₃ добавляли к ZnO и активно перемешивали в течение часа;

4) для предотвращения активной агломерации серебра во время восстановления добавляли раствор PVP, который брался эквимолярно AgNO₃;

5) итоговый раствор перемешивали в течение часа;

6) для восстановления серебра использовали раствор NaBH₄ эквимолярный AgNO₃;

В результате получались образцы с различным соотношением компонентов.

3. Результат и обсуждение

3.1. Характеризация образцов

Полученные образцы имели разную окраску, начиная от бледно-желтого до темно-серого. Наличие желтого оттенка можно считать косвенным признаком восстановления наночастиц серебра на поверхности субстрата. В табл. 1 приведены внешние характеристики полученных образцов.

При помощи сканирующего электронного микроскопа фирмы Bruker были получены СЭМ снимки поверхности исследуемых образцов (рис. 1). Первичный анализ снимков показал, что используемый субстрат является мелкодисперсным порошком. Согласно полученному снимку чистого оксида цинка при 5000-кратном увеличении можно отметить, что размер частиц ZnO лежит в субмикронной области. Анализ снимков модифицированных образцов (рис. 1б–г) позволяет сделать аналогичный вывод о дисперсности образцов.

Таблица 1. Характеристика синтезированных образцов

Образец/ элемент	Содержание серебра, массовый %	Цвет порошка
ZnO	0	Белый
ZnO-Ag-0.2	0.2	Светло-желтый
ZnO-Ag-0.5	0.5	Желтый
ZnO-Ag-2	2	Темно-серый

Для получения дополнительной информации о поверхности порошкового катализатора было проведено сканирование поверхности при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) Ntegra Prima фирмы «НТ-МДТ». Сканирование проводилось в полуkontakteчном режиме. В результате были получены сканы поверхности образца ZnO-Ag-2 (рис. 2). Анализ сканов позволил получить дополнительную информацию о поверхности образца: порошок имеет как крупные обра-

зования более 1 мкм, так и более мелкие размером примерно 200 нм. Данные, полученные на основе этих сканов, не дают достоверного подтверждения об осаждении наночастиц серебра на поверхности субстрата.

Для подтверждения наличия серебра на поверхности синтезированных образцов был проведен энергодисперсионный анализ (EDX). Локальный химический состав был оценен по EDX спектрам синтезированных образцов, которые

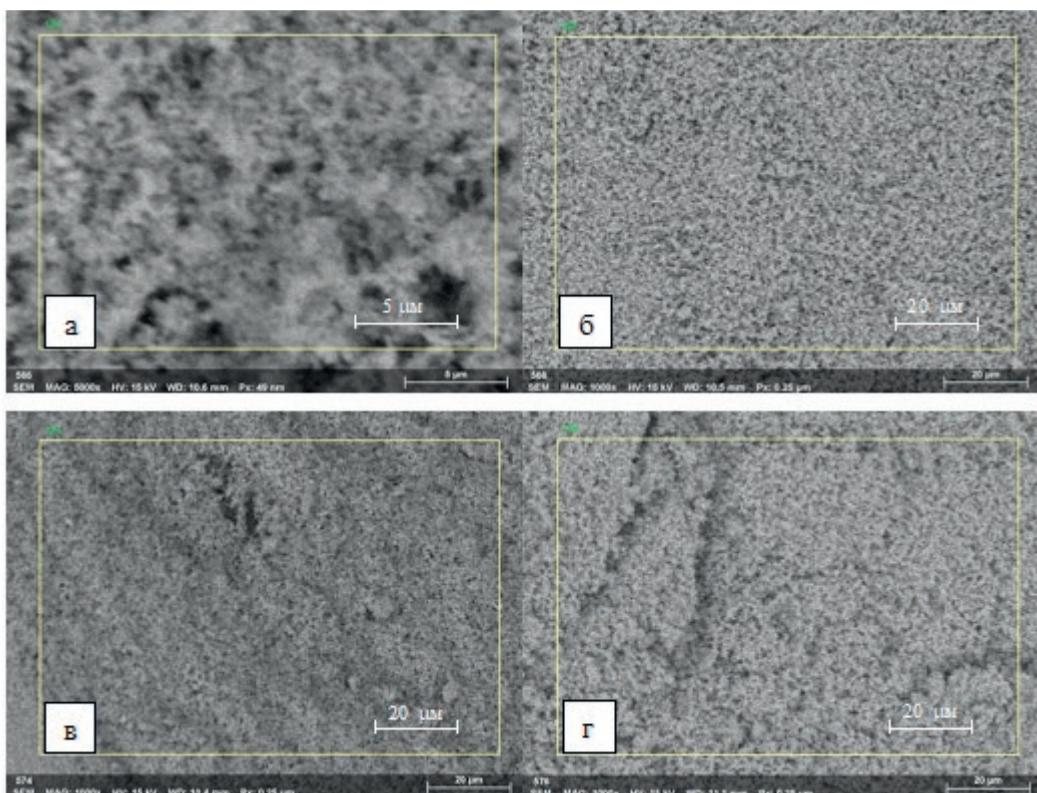


Рис. 1. СЭМ снимки образцов: а) – чистый ZnO; б) – ZnO-Ag-0.2; в) – ZnO-Ag-0.5; г) – ZnO-Ag-2

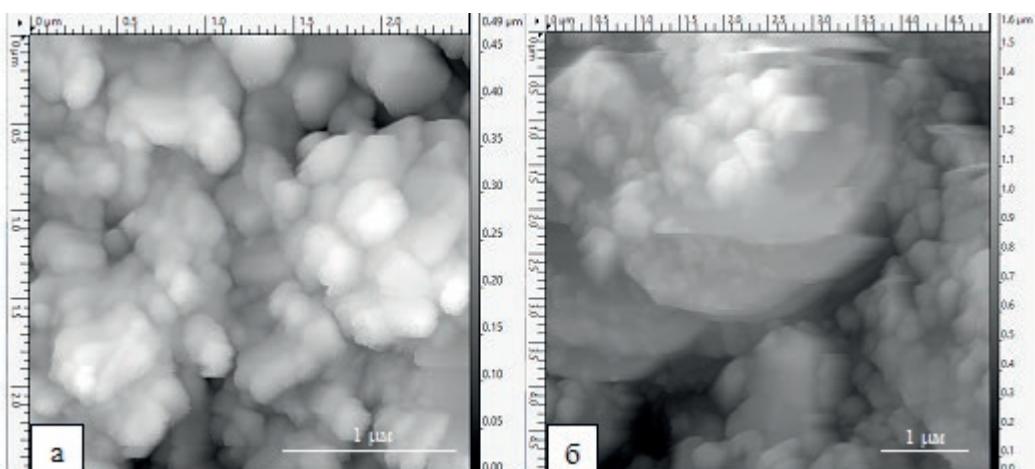


Рис. 2. Скан АСМ поверхности образца ZnO-Ag-2. Площадь сканирования а) – 2.5x2.5 мкм, б) – 5x5 мкм

представлены на рис. 3. В спектре EDX для чистого образца ZnO (рис. 3а) хорошо различимы основные элементы Zn, O, но также имеют место быть C, Al и Si. Наличие углерода, алюминия и кремния связано с особенностями подложки, на которую были нанесены образцы.

EDX спектр образца ZnO-Ag-0.2 представлен на рис. 3б. Спектральная картина образца показывает, что кроме примеси C и Al, наблюдаются характерные рентгеновские линии, соответствующие Ag (около 0.25 КэВ и 3 КэВ). EDX спектры остальных образцов также показывают наличие серебра в полученных образцах (рис. 3в, г). На основе полученных спектров был произведен количественный анализ образцов. Рассчитанные значения массовых процентов элементов приведены в табл. 2.

При помощи элементного картирования образца ZnO-Ag-0.2 удалось оценить равномерность восстановления наночастиц Ag (рис. 4). Полученная элементная карта подтверждает нали-

чие однородно распределенного серебра на поверхности субстрата.

Согласно полученным массовым процентам элементов композита (табл. 2), рассчитанных на основе спектров EDX, можно отметить, что состав синтезированных образцов соответствует расчетному составу. Полученные данные позволяют достоверно выявить взаимосвязь между изменением фотокаталитической активности композита и количеством осажденного серебра.

3.2. Оценка фотокаталитической активности образцов

Оценка активности образцов проводилась на основе фотокаталитического процесса разложение Родамин 6G (R6G). Исходная концентрация органического красителя составляла 21 ± 0.64 мкмоль/литр, объем раствора составлял 75 мл. Оценка изменения концентрации красителя проводилась с помощью спектрофотометра ПЭ 5400УФ. Родамин 6G имеет ярко выраженный

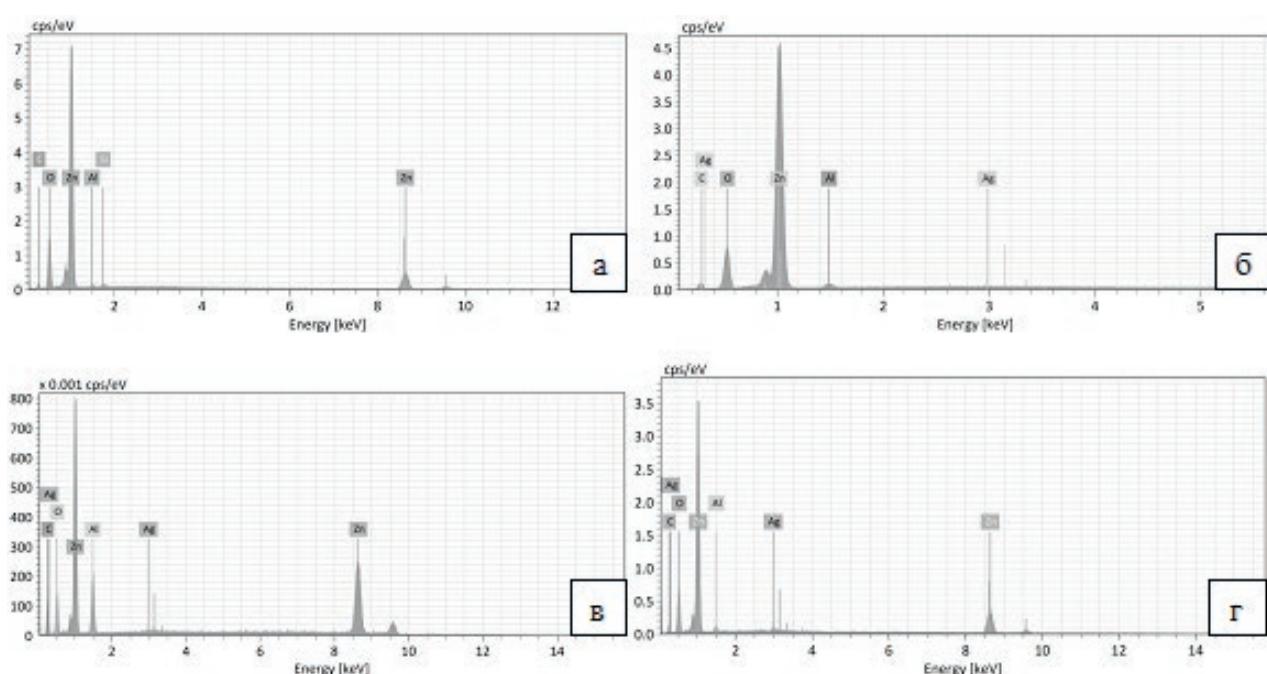


Рис. 3. Энергодисперсионные спектры EDX а) – чистого ZnO; б) – ZnO-Ag-0/2; в) – ZnO-Ag-0/5; г) – ZnO-Ag-2

Таблица 2. Процентное соотношение элементов композита согласно спектрам EDX

Образец/элемент	Zn (мас. %)	O (мас. %)	Ag (мас. %)
ZnO	77	23	–
ZnO-Ag-0.2	86	15	0.13
ZnO-Ag-0.5	86.65	13	0.35
ZnO-Ag-2	80.5	17.12	2.38

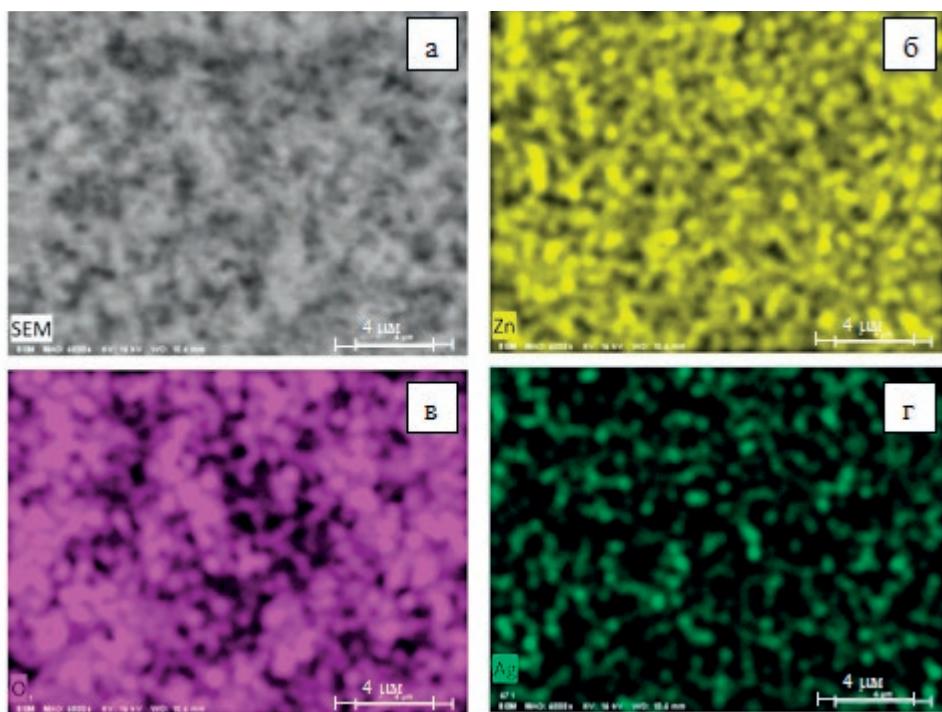


Рис. 4. Элементная карта ZnO-Ag-0,2: а) – СЭМ снимок поверхности; карта концентраций элементов: б) – Zn; в) – O; г) – Ag

пик поглощения (526 нм), и его интенсивность бралась для расчета концентрации по закону Бугера–Ламберта–Бера. Измерение спектральной характеристики Родамина 6G проводилось через 5 и 10 минут после начала облучения катализатора УФ-светом. В качестве источника излучения брался УФ-диод с длинной волны 365 нм и мощностью 4.9 Вт. Фотокаталитическое разложение исследовалось при постоянном перемешивании. Масса катализатора составляла 5.3 ± 0.2 мг. Исследование проводилось не менее трех раз для каждого из образцов для получения более точных данных об их активности.

Так как за основу синтезированных катализаторов брался один и тот же коммерческий оксид цинка с одинаковой удельной поверхностью, то в качестве сравнительной характеристики была использована весовая активность. В табл. 3 представлены результаты расчетов.

Анализ полученных результатов показал, что средняя активность композитного материала превышает активность исходного субстрата на 58 % (образец ZnO-Ag-0,2). С ростом количества осажденного серебра от 0,2 до 2 % активность композита повышается с 58 до 92 %. Эта зависимость имеет нелинейный характер и начинает выходить на насыщение после 2 мас. % осажденного серебра (рис. 5). Согласно полученной зависимости, можно отметить, что дальнейшее увеличения количества серебра не приводит к существенному росту активности композитного материала, напротив, возрастает вероятность нежелательного перекрытия активных каталических центров оксида цинка.

Для получения более полных данных о синтезированных катализаторах была изучена кинетика протекания реакции. Кинетика фоторазложения красителей обычно описывается моде-

Таблица 3. Сводная таблица результатов исследования активности образцов

Образец	Весовая активность (300 с), мкмоль/(грамм·сек)	Весовая активность (600 сек), мкмоль/(грамм·с)	Константа скорости, мин ⁻¹
ZnO	0.3447	0.2348	0.0660
ZnO-Ag-0,2	0.5461	0.3330	0.1030
ZnO-Ag-0,5	0.6265	0.3648	0.1350
ZnO-Ag-2	0.6611	0.3945	0.1631

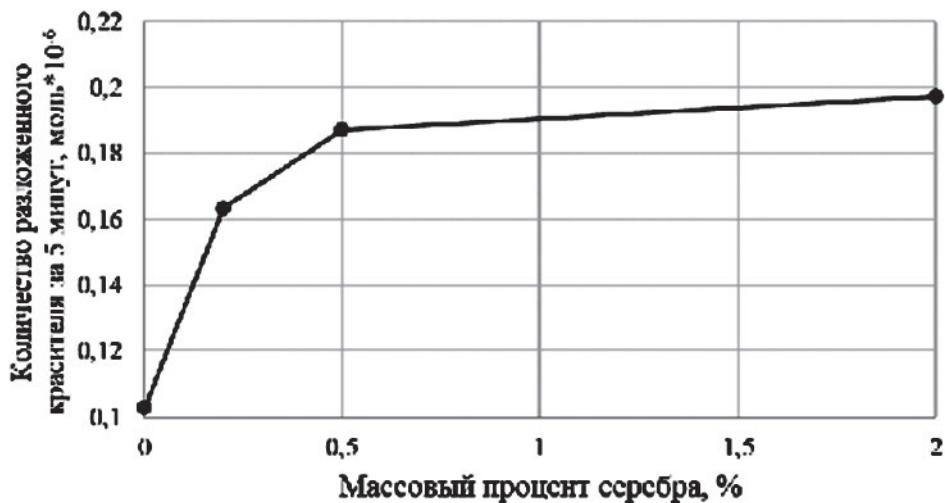


Рис. 5. График зависимости активности композита от содержания серебра

лью Ленгмюра–Хиншельвуда и аппроксимируется кинетическим уравнением:

$$-dC/dt = k_1 K_a C_1 + K_a C,$$

где C – текущая концентрация красителя в момент t , k_1 – константа скорости процесса, K_a – константа адсорбционного равновесия.

При низкой концентрации красителя ($C \ll 1$ mM) уравнение упрощается до уравнения псевдо-первого порядка скорости процесса:

$$\ln(C/C_0) = k_1 K_a t = k_{app} t,$$

где k_{app} – константа скорости псевдо-первого порядка.

На рис. 6 приведен график зависимости $\ln(C/C_0) = f(t)$, построенный на основании экспериментальных данных. При помощи линейной аппроксимации были определены константы скорости для исследуемых образцов, рассчитанные значения были занесены в табл. 3. Так как константа скорости численно равна скорости реакции, то значение константы позволяет оценить влияние катализатора на скорость процесса фотодеградации красителя. На основе полученных данных можно сказать, что осаждение 0.2 мас. % серебра приводит к ускорению реакции фотокаталитической деградации на 56 %, а при достижении 2 мас. % скорость увеличивается на 147 %.

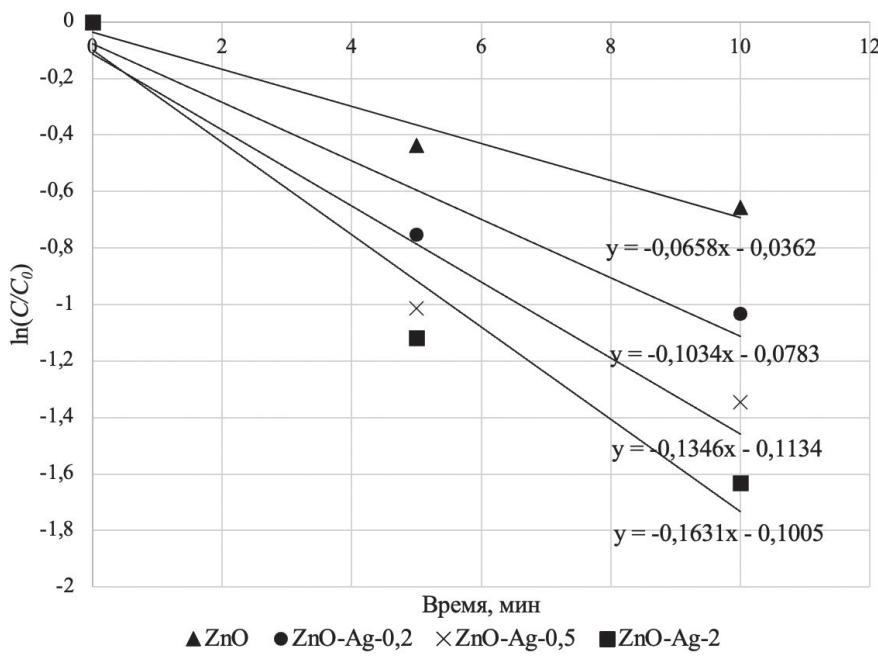


Рис. 6. График зависимости $\ln(C/C_0) = f(t)$

4. Выводы

В ходе данной работы были синтезированы образцы композитов с различным содержанием серебра на его поверхности. По спектрам EDX оценено количество серебра в композите. Полученные результаты сопоставляются с расчётыми значениями и позволяют выявить корреляцию между количеством серебра и изменением активности композита. Для подтверждения равномерности восстановления серебра была получена элементная карта образца ZnO-Ag-0.2.

Анализ активности композитов, содержащих серебро, показал положительное влияние осажденного серебра на свойства оксида цинка. С ростом количества серебра наблюдается повышение каталитической активности. Образец ZnO-Ag-2 имеет весовую активность выше на 92 % по сравнению с исходным ZnO и увеличивает скорость фотокаталитической деградации на 147 %. Согласно имеющейся зависимости активности от количества серебра можно отметить, что 2 мас. % оптимальное предельное значение, при котором происходит существенное повышение активности композита.

Заявленный вклад авторов

Радайкин Д. Г. – проведение эксперимента, написание обзора, итоговые выводы. Мошников В. А. – научное руководство, постановка задач и обсуждение результатов, редактирование текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Tao Y., Ma Z., Wang W. Nickel phosphide clusters sensitized TiO₂ nanotube arrays as highly efficient photoanode for photoelectrocatalytic urea oxidation. *Advanced Functional Materials*. 2023;33(9): 2211169. <https://doi.org/10.1002/adfm.202211169>
2. Li S., Shang H., Tao Y., ... Li H. Hydroxyl radical-mediated efficient photoelectrocatalytic NO oxidation with simultaneous nitrate storage using a flow photoanode reactor. *Angewandte Chemie*. 2023;62: e202305538. <https://doi.org/10.1002/ange.202305538>
3. Wadsworth A., Hamid Z., Kosco J., Gasparini N., McCulloch I. The bulk heterojunction in organic photovoltaic, photodetector, and photocatalytic applications. *Advanced Materials*. 2020;32(38): e2001763. <https://doi.org/10.1002/adma.202001763>
4. Kumari P., Bahadur N., Kong L., O'Dell L. A., Merenda A., Dume L. Engineering Schottky-like and heterojunction materials for enhanced photocatalysis performance – a review. *Materials Advances*. 2022; 2309–2323. <https://doi.org/10.1039/D1MA01062J>
5. Sun M., Li F., Zhao F., ... Li D. Ionic liquid-assisted fabrication of metal–organic framework-derived indium oxide/bismuth oxyiodide *p-n* junction photocatalysts for robust photocatalysis against phenolic pollutants. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022;606: 1261–1273. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.132>
6. Zhou Y., Zhang C., Huang D., ... Qin D. Structure defined 2D Mo₂C/2Dg-C₃N₄ Van der Waals heterojunction: oriented charge flow in-plane and separation within the interface to collectively promote photocatalytic degradation of pharmaceutical and personal care products. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2022;301: 120749. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120749>
7. Bao S., Wang Z., Zhang J., Tian B. Facet-heterojunction-based Z-Scheme BiVO₄010 microplates decorated with AgBr-Ag nanoparticles for the photocatalytic inactivation of bacteria and the decomposition of organic contaminants. *ACS Applied Nano Materials*. 2020;3: 8604–8617. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c00703>
8. Kannan K., Radhika D., Sadasivuni K. K., Reddy K. R., Raghu A. V. Nanostructured metal oxides and its hybrids for biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2019: 102178. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102178>
9. Wang J., Liu J., Du Z., Li Z. Recent advances in metal halide perovskite photocatalysts: properties, synthesis and applications. *Journal of Energy Chemistry*. 2021;54: 770–785. <https://doi.org/10.1016/j.jec.2020.06.024>
10. Wlazlak E., Blachecki A., Bisztyga-Szklarz M., ... Zawal P. Heavy pnictogen chalcogenides: the synthesis, structure and properties of these rediscovered semiconductors. *Chemical Communications*. 2018;54: 12133–12162. <https://doi.org/10.1039/C8CC05149F>
11. Du C., Zhang Z., Yu G., ... Wang S. A review of metal organic framework (MOFs)-based materials for antibiotics removal via adsorption and photocatalysis. *Chemosphere*. 2021;272: 129501. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129501>
12. He Z., Goulas J., Parker E., Sun Y., Zhou X., Fei L. Review on covalent organic frameworks and derivatives for electrochemical and photocatalytic CO₂ reduction. *Catalysis Today*. 2023;409: 103–118. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.04.021>
13. Solangi N. H., Karri R. R., Mazari S. A., ... Azad A. K. MXene as emerging material for photocatalytic degradation of environmental pollutants. *Coordination Chemistry Reviews*. 2023;477: 214965. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214965>
14. Козодаев Д. А., Муратова Е. Н., Мошников В. А. От нанотехнологии к наноархитектонике. Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. 2024;1(79): 356–358.
15. Бобков А. А., Радайкин Д. Г., Мошников В. А. Наноархитектоника пористых иерархических структур для фотокатализа и сенсорики. В сборнике: Химическая термодинамика и кинетика. Сборник научных трудов XII Международной научной конференции. Великий Новгород; 2022. с. 69–70.

16. Наночастицы, наносистемы и их применение. Каталитические наносистемы / под ред. В.А. Мошникова, А. И. Максимова. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2022. 220 с.
17. Maraeva E., Radaykin D., Bobkov A.,... Moshnikov V. Sorption analysis of composites based on zinc oxide for catalysis and medical materials science. *Chimica Techno Acta*. 2022;9(4): 20229422. <https://doi.org/10.15826/chimtech.2022.9.4.22>
18. Бобков А. А., Лашкова Н. А., Максимов А. И., Мошников В. А., Налимова С. С. Получение гетероструктурных оксидных композиций для перспективных солнечных элементов нового поколения. *Физика и техника полупроводников*. 2017;51(1): 63–67. <https://doi.org/10.1134/S1063782617010031>
19. Мошников В. А., Таиров Ю. М., Хамова Т. В., Шилова О. А. Золь-гель технология микро- и нанокомпозитов. СПб: Изд-во «Лань»; 2013. 304 с.
20. Шомахов З. В., Налимова С. С., Гукетлов А. М., Кондратьев В. М., Мошников В. А. Управление свойствами адсорбционных центров при формировании газочувствительных структур смешанных оксидов. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2024;29(1): 7–18. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-1-7-18>
21. Pronin I. A., Plugin I. A., Kolosov D. A.... Sysoev V. V. Sol-gel derived ZnO film as a gas sensor: Influence of UV processing versus a thermal annealing. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024; 377: 115707. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115707>
22. Kareem M. A., Bello I. T., Shittu H. A. Green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) for optical and photocatalytic applications: a review. *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;805(1): 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/805/1/012020>
23. Zhu H., Chen X., Zheng Z. Mechanism of supported gold nanoparticles as photocatalysts under ultraviolet and visible light irradiation. *Chemical Communications*. 2009;48: 7524–7526. <https://doi.org/10.1039/B917052A>
24. Радайкин Д. Г., Бобков А. А. Влияние плазмонного эффекта наночастиц серебра на каталитическую активность оксида цинка. IV Всесоюзный Конгресс по сенсорике и экономике «СЕНСОРНОЕ СЛИЯНИЕ-2023». 2023. с. 153–157.
25. Пермяков Н. В., Мараева Е. В., Бобков А. А., Радайкин Д. Г., Мошников В. А. Исследование материалов на основе ZnO для задач катализа и медицинского материаловедения. *Нанофизика и наноматериалы. Сборник научных трудов Международного симпозиума, посвященного 110-летию В. Б. Алексовского и 115-летию Л. А. Сена, Санкт-Петербург*. 2022. с. 213–217. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50737548>
26. Subramanian V. Catalysis with TiO₂/gold nanocomposites. Effect of metal particle size on the Fermi level equilibration. *Journal of the American Chemical Society*. 2004;126: 4943–4950. <https://doi.org/10.1021/ja0315199>
27. Kareem M. A., Bello I. T., Shittu H. A., Sivaprakash P., Adedokun O., Arumugam S. Synthesis, characterization, and photocatalytic application of silver doped zinc oxide nanoparticles. *Cleaner Materials*. 2022;3(1): 100041. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100041>
28. Vaianoa V., Matarangoloa M., Murciab J. J., Rojasb H., Navíoc J. A., Hidalgoe M. C. Enhanced photocatalytic removal of phenol from aqueous solutions using ZnO modified with Ag. *Applied Catalysis B Environmental*. 2018;225: 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.075>

Информация об авторах

Радайкин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры микро- и наноэлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7125-9744>
dima19980219@gmail.com

Мошников Вячеслав Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры микро- и наноэлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>
vamoshnikov@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2024; одобрена после рецензирования 30.01.2025; принята к публикации 17.02.2024; опубликована онлайн 25.06.2025.