

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-06-87-98

УДК 620.3; 535.37; 533.9; 533.924; 535.24

Влияние плазменной обработки гибридных фотокатализаторов Ag/ZnO на оптические свойства и морфологию наночастиц Ag

Наталья Александровна Савастенко¹, Анастасия Алексеевна Щербович²,
Вероника Александровна Люшкевич³, Ирина Ивановна Филатова⁴,
Сергей Александрович Маскевич⁵✉

^{1, 2, 5}Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь
^{2, 3, 4}Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

¹nataliesavastenko@iseu.by <https://orcid.org/0000-0003-4039-2515>

²scherbovich.a.a@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-4401-1110>

³v.lyushkevich@ifanbel.bas-net.by <https://orcid.org/0000-0001-8592-4373>

⁴filatova@presidium.bas-net.by <https://orcid.org/0000-0002-3875-6466>

⁵MaskevichSA@bsu.by <https://orcid.org/0000-0001-7644-4968>

Аннотация

Предмет исследования. Гибридные фотокатализаторы Ag/ZnO и наночастицы серебра как активная фаза гибридных фотокатализаторов после обработки в низкотемпературной плазме диэлектрического барьерного разряда. **Цель работы.** Установление характера влияния плазменной обработки гибридных фотокатализаторов Ag/ZnO на оптические свойства и морфологию наночастиц серебра и взаимосвязи плазмоиндуцированных морфологических изменений наночастиц серебра и фотокаталитической активности Ag/ZnO в реакциях фотодегградации метилового оранжевого и кофеина. **Метод.** Обработка гибридных фотокатализаторов Ag/ZnO и ансамблей наночастиц серебра проводилась в плазме диэлектрического барьерного разряда в воздухе при нормальном давлении. Фотокаталитические свойства исходных и обработанных в плазме материалов исследованы с точки зрения их активности в реакциях разложения метилового оранжевого и кофеина в водных растворах под действием ультрафиолетового света. Концентрация метилового оранжевого и кофеина измерена спектрофотометрическим методом. Изменение свойств исходных и модифицированных плазмой материалов изучено с помощью методов фотолюминесцентной спектроскопии, спектрофотометрии, атомно-силовой микроскопии. **Основные результаты.** Обнаружено плазмоиндуцированное уменьшение размеров агрегатов наночастиц серебра при одновременном увеличении количества отдельных наночастиц. Показано, что изменение размеров наночастиц существенно зависит от времени воздействия на них плазмы диэлектрического барьерного разряда. Обработка плазмой гибридных фотокатализаторов Ag/ZnO сопровождалась заметным увеличением длительности флуоресценции ZnO и может являться одним из факторов повышения их фотокаталитической активности в реакциях фотодегградации органических примесей в водных средах. **Практическая значимость.** Повышение эффективности катализаторов Ag/ZnO для очистки водных сред от органических примесей методом фотодегградации является важной задачей в области эффективного природопользования.

Ключевые слова: фотокатализатор, ZnO, фотодеградация, обработка в плазме, плазмонные наночастицы, атомная силовая микроскопия, фотометрия, длительность флуоресценции, диэлектрический барьерный разряд

Благодарность: авторы благодарны сотрудникам Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований» физического факультета Белорусского государственного университета за помощь в проведении исследований методом атомно-силовой микроскопии, а также сотрудникам лаборатории молекулярной спектроскопии и фотоники наноструктур Гродненского государственного университета им. Я. Купалы за помощь в проведении исследований кинетики затухания флуоресценции. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Конвергенция–2025», задание 2.2.02 и поддержана Министерством образования РБ, проект № 20211534.

Ссылка для цитирования: Савастенко Н.А., Щербович А.А., Люшкевич В.А., Филатова И.И., Маскевич С.А. Влияние плазменной обработки гибридных фотокатализаторов Ag/ZnO на оптические свойства и морфологию наночастиц Ag // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 6. С. 87–98. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-06-87-98>

Коды OCIS: 180.0180, 240.6680, 250.5230, 300.1030.

Effect of plasma treatment of Ag/ZnO hybrid photocatalysts on the optical properties and morphology of Ag nanoparticles

NATALIYA A. SAVASTENKO¹, ANASTASIYA A. SHCHERBOVICH²,
VERONIKA A. LUSHKEVICH³, IRINA I. FILATOVA⁴, SERGEY A. MASKEVICH⁵✉

^{1, 2, 5} Sakharov International State Ecological Institute of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

^{2, 3, 4} Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

¹nataliesavastenko@iseu.by

<https://orcid.org/0000-0003-4039-2515>

²scherbovich.a.a@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4401-1110>

³v.lyushkevich@ifanbel.bas-net.by

<https://orcid.org/0000-0001-8592-4373>

⁴filatova@presidium.bas-net.by

<https://orcid.org/0000-0002-3875-6466>

⁵MaskevichSA@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-7644-4968>

Abstract

Subject of study. Ag/ZnO hybrid photocatalysts and silver nanoparticles as the active phase of hybrid photocatalysts after treatment in low-temperature plasma of a dielectric barrier discharge. **Aim of study.** The paper aimed to establishing the nature of the influence of plasma treatment of Ag/ZnO hybrid photocatalysts on the optical properties and morphology of silver nanoparticles and the relationship between plasma-induced morphological changes in silver nanoparticles and the photocatalytic activity of Ag/ZnO in the photodegradation reactions of methyl orange and caffeine. **Method.** The treatment of hybrid Ag/ZnO photocatalysts and ensembles of silver nanoparticles was carried out in a dielectric barrier discharge plasma in air at normal pressure. The photocatalytic properties of the original and plasma-treated materials were studied from the point of view of their activity in the decomposition reactions of methyl orange and caffeine in aqueous solutions by ultraviolet light exposure. The concentrations of methyl orange and caffeine were measured by spectrophotometry. Changes in the properties of the original and plasma-modified materials were studied using the methods of photoluminescence spectroscopy, spectrophotometry, and atomic force microscopy. **Main results.** A plasma-induced decrease in the size of agglomerates of silver nanoparticles was observed. The size decrease of silver nanoparticles agglomerates was accompanied with a simultaneous increase in the number of individual nanoparticles. It was shown that the change in nanoparticles size depended on the energy of plasma treatment duration. Plasma treatment of ZnO-based hybrid photocatalysts resulted in a noticeable increase in the fluorescence lifetime of ZnO. Increase in the fluorescence

lifetime can be considered as one of the factors increasing the photocatalysts activity in the reaction of photodegradation of organic pollutants in aqueous media. **Practical significance.** Increasing the efficiency of Ag/ZnO for purifying aqueous media from organic impurities by photodegradation is an important task in the field of effective environmental management.

Keywords: photocatalysts, ZnO, photodegradation, plasma treatment, plasmonic nanoparticles, atomic force microscopy, ultraviolet and visible spectroscopy, fluorescence lifetime, dielectric barrier discharge

Acknowledgment: the authors are grateful to the staff of the Center for Shared Use of Unique Scientific Equipment “Belarusian Interuniversity Center for Scientific Research Services” of the Faculty of Physics of the Belarusian State University for assistance in conducting research using atomic force microscopy, as well as to the staff of the Laboratory of Molecular Spectroscopy and Photonics of Nanostructures of the Y. Kupala State University of Grodno for assistance in conducting studies of fluorescence decay kinetics. This work was partially financially supported by the State Research Program “Convergence 2025. Task 2.2.02.” and by the Ministry of Education of Republic of Belarus (Grant № 20211534).

For citation: Savastenko N.A., Shcherbovich A.A., Lyushkevich V.A., Filatova I.I., Maskevich S.A. Effect of plasma treatment of Ag/ZnO hybrid photocatalysts on the optical properties and morphology of Ag nanoparticles [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 6. P. 87–98. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-06-87-98>

OCIS codes: 180.0180, 240.6680, 250.5230, 300.1030.

ВВЕДЕНИЕ

Для очистки водных сред от органических примесей в настоящее время широко используются фотокатализаторы. Наиболее эффективными являются катализаторы на основе TiO_2 [1, 2]. Однако данные катализаторы имеют высокую стоимость. Поэтому, прежде всего по экономическим соображениям, в научной литературе много внимания уделяется разработке фотокатализаторов на основе ZnO [3, 4]. Повышение фотоактивности таких катализаторов путём создания различных наноконструктивных структур является важной задачей в области эффективного природопользования. В предыдущих наших работах [5, 6] было показано, что для этих целей могут быть полезны гибридные фотокатализаторы Ag/ZnO, полученные методом пропитки ZnO коллоидом, содержащим наночастицы серебра (Ag-НЧ), с последующей обработкой в плазме диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в воздухе при нормальном давлении. Положительный эффект при использовании таких фотокатализаторов достигнут в реакциях фотодегградации метилового оранжевого и кофеина бензоата натрия под действием ультрафиолетового излучения [5, 6]. При этом было установлено, что существует оптимальное значение эффективной энергии, вложенной в разряд за время обработки материалов в плазме, соответствующее

максимальной фотокаталитической активности обработанных материалов.

Целью настоящей работы было установление характера влияния плазменной обработки гибридных фотокатализаторов Ag/ZnO на оптические свойства и морфологию наночастиц серебра и взаимосвязи плазмоиндуцированных морфологических изменений наночастиц серебра и фотокаталитической активности Ag/ZnO в реакциях фотодегградации метилового оранжевого и кофеина. В работе на основе реакций фотодегградации метилового оранжевого и кофеина проведены системные исследования изменений фотокаталитической активности и спектрально-люминесцентных характеристик гибридных Ag/ZnO катализаторов, а также морфологии Ag-НЧ, происходящих под действием плазмы диэлектрического барьерного разряда.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Фотокаталитическую активность исследовали в модельной реакции разложения кофеина бензоата натрия или метилового оранжевого под действием ультрафиолетового излучения в водных суспензиях синтезированных образцов. Подробная методика определения фотокаталитической активности образцов приведена в работах [5, 6]. При проведении экспери-

ментов для приготовления суспензии навеску катализатора массой 40 мг смешивали с 20 мл водного раствора кофеина бензоата натрия концентрации 300 мг/л или метилового оранжевого концентрации 50 мг/л. Выбранные концентрации веществ для модельных реакций находятся в соответствии с данными о концентрации фармакологических отходов или отходов текстильной промышленности, содержащихся в сточных водах [1–4], и попадают в линейный диапазон калибровочного графика зависимости оптической плотности от концентрации поглощающего вещества.

Суспензии катализаторов в водных растворах модельных веществ подвергали воздействию ультрафиолетового (УФ) излучения. В качестве источника УФ излучения использовали ртутно-кварцевую лампу ДРТ-240 (мощность 240 Вт). Исследуемые образцы в чашках Петри размещали на расстоянии 10 см от источника облучения. Облучение образцов проводили в течение 2-х часов или до полного их обесцвечивания. В процессе облучения контролировали изменение концентрации модельного вещества в растворе с помощью спектрофотометра.

В качестве меры фотокаталитической активности катализаторов была принята константа реакции фоторазложения модельного вещества (метилового оранжевого, кофеина). При этом предполагалось, что в целом реакция фотодеградация является реакцией первого (или псевдо-первого) порядка, которую можно описать следующим кинетическим уравнением [5, 6]:

$$\frac{dC}{dt} = -kC. \quad (1)$$

Здесь C — концентрация фоторазрушаемого вещества, k — константа реакции.

Детальное описание установки на основе диэлектрического барьерного разряда, схемы измерений электрических характеристик разряда, метод расчёта эффективной энергии E_{eff} , вложенной в разряд за время обработки материалов в плазме, приведены в работах [5, 6].

Основные электрические параметры: падение напряжения на разрядном промежутке U , ток, протекающий в цепи разряда I , перемещённый заряд Q , энергия, вложенная за один цикл разряда, т.е. в течение одного периода E_{el} ,

измерялись по схеме и рассчитывались по методике, предложенной в [7].

Ток разряда и падение напряжения на разрядном промежутке могут быть измерены непосредственно. Энергия E_{el} была рассчитана как площадь фигуры, построенной в координатах: перемещённый заряд — напряжение на электродах ячейки (вольт-кулоновская характеристика, циклограмма, $(Q-U)$ -диаграмма):

$$E_{\text{el}} = \int U(t) dQ = \int (Q-U) dQ. \quad (2)$$

При регистрации циклограммы шунт заменяли на конденсатор. Ток разряда рассчитывали по измеренному падению напряжения на шунте ($R_{\text{meas}} = 76 \text{ Ом}$). Перемещённый заряд $Q(t)$ рассчитывается по падению напряжения $U_T(t)$, измеренного на конденсаторе ($C_{\text{meas}} = 22,6 \text{ нФ}$):

$$U_T(t) = \frac{1}{C_{\text{meas}}} \int_{t_0}^t U_T(t') dt' = \frac{Q(t)}{C_{\text{meas}}}. \quad (3)$$

Эффективную энергию E_{eff} , вложенную в разряд за время обработки материалов в плазме t_{tret} , оценивали по формуле:

$$E_{\text{eff}} = E_{\text{el}} t_{\text{tret}} f, \quad (4)$$

где f — частота разряда.

Для установления закономерностей влияния плазмы ДБР на морфологию Ag-НЧ проведены модельные эксперименты, в которых коллоид серебра был осаждён на кварцевые пластины и после испарения жидких компонентов при комнатной температуре подвергался плазменному воздействию различной длительности. Длительность обработки серебра плазмой диэлектрического барьерного разряда выбирали таким образом, чтобы эффективная электрическая энергия, вложенная в разрядный промежуток за время воздействия, соответствовала значениям эффективной энергии, реализованной в наших предыдущих экспериментах с гибридными фотокатализаторами [5, 6].

Коллоид Ag-НЧ синтезировали цитратным методом. Для этого в 50 мл водного раствора нитрата серебра AgNO_3 ($C = 10^{-3} \text{ М}$), нагретого до кипения, добавляли 1 мл однопроцентного водного раствора цитрата натрия $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3$.

Далее полученный раствор выдерживали 1 час при температуре кипения. Подробное описание метода приготовления коллоида наночастиц серебра можно найти в работах [8, 9].

Измерения кинетики затухания флуоресценции проведены на установке, описанной ранее [10]. Для измерения длительности затухания флуоресценции в настоящей работе использовался метод коррелированного счёта одиночных фотонов [11], имеющий большой динамический диапазон и возможность исследования кинетики свечения образцов с низким квантовым выходом флуоресценции, а также программные продукты, описанные в работе [12]. Для возбуждения флуоресценции использовался импульсный диодный лазер PDL-405 (PicoQuant, Германия), генерирующий световые импульсы длительностью 70 пс с частотой следования до 40 МГц и длиной волны 467 нм. Среднее время жизни флуоресцентного состояния ZnO определено по формуле:

$$\langle \tau_{fl} \rangle = \sum a_i \tau_i^2 \left(\sum a_i \tau_i \right)^{-1}, \quad (5)$$

где τ_i и a_i — время жизни и весовой множитель i -й компоненты. При этом кривые затухания флуоресценции моделировались тремя экспонентами.

Исследования образцов методом атомной силовой микроскопии (АСМ) проведены с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro (ЗАО «НТ-МДТ», Россия) в режиме амплитудно-частотной модуляции методом постоянной силы. Использовались стандартные бесконтактные кантилеверы с резонансной частотой 185 кГц и радиусом кривизны кон-

чика иглы 10 нм. Обработка изображений проводилась с помощью программного обеспечения, поставляемого вместе с микроскопом.

Контроль концентрации метилового оранжевого и кофеина, а также регистрацию спектров оптической плотности осаждённых на кварцевых пластинах из гидрозолей НЧ серебра в модельных экспериментах, осуществляли с использованием спектрофотометра SOLAR PB 2201 (SOLAR, Республика Беларусь).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице представлены результаты экспериментальных исследований различных фотокатализаторов в указанных реакциях структурной фотодегradации. Активность фотокатализаторов выражена значениями константы k модельной реакции.

В таблице приведены данные для катализаторов, обработанных в плазме ДБР при условиях, обеспечивающих наиболее высокую фотокаталитическую активность в реакциях фотодегradации метилового оранжевого и кофеина: Ag/ZnO-DBD-25 и Ag/ZnO-DBD-15. Для сравнения представлены также данные для материалов, обработка которых представляла пошаговую модификацию исходного материала ZnO: нанесение наночастиц серебра (Ag/ZnO), обработка в плазме ДБР исходного материала без внесения на его поверхность наночастиц (ZnO-DBD-25).

Как видно из таблицы (№ п/п 1.3 и 2.4), оптимальное значение эффективной энергии E_{eff} , необходимой для достижения максимальной

Эффективность каталитического действия (k) и средняя длительность флуоресценции ($\langle \tau_{fl} \rangle$) фотокатализаторов на основе ZnO в реакциях фотодегradации кофеина и метилового оранжевого
Catalytic efficiency (k) and average fluorescence duration ($\langle \tau_{fl} \rangle$) of ZnO-based photocatalysts in the photodegradation reactions of caffeine and methyl orange

№ п/п	Объект фоторазрушения	Катализатор	E_{eff} , Дж	$k \times 10^3$, с ⁻¹	$\langle \tau_{fl} \rangle$, нс
1.1	кофеин	ZnO	0	0,12	5,02
1.2		Ag/ZnO	0	0,07	3,28
1.3		Ag/ZnO-DBD-15	18000	0,2	13,34
2.1	метилоранжевый	ZnO	0	1,4	5,02
2.2		ZnO-DBD-25	9750	2,8	5,61
2.3		Ag/ZnO	0	1,3	3,28
2.4		Ag/ZnO-DBD-25	9750	4,0	3,86

эффективности гибридного катализатора, содержащего наночастицы серебра в реакции фоторазрушения кофеина, почти в 2 раза превышает соответствующее значение E_{eff} , необходимое для достижения максимальной эффективности в реакции фоторазрушения метилового оранжевого. При этом эффективность гибридного фотокатализатора Ag/ZnO-DBD, обработанного в плазме, в реакции фоторазрушения кофеина повышается в 1,7 раз, в то время, как в реакции фоторазрушения метилового оранжевого — примерно в 3 раза. При этом, активность исходного материала — немодифицированного ZnO — в обеих реакциях различается только на 20%. При этом следует отметить, что концентрация кофеина в исходном растворе до облучения и добавления катализатора в 6 раз превышает концентрацию метилового оранжевого. Таким образом, немодифицированный оксид цинка является более эффективным катализатором в реакции фотодегградации кофеина, чем метилового оранжевого. Однако допирование ZnO наночастицами Ag с последующей плазменной обработкой приводит к более существенному эффекту в реакции фоторазрушения метилового оранжевого, чем кофеина.

Допирование ZnO наночастицами Ag без обработки в плазме ДБР снижает фотокаталитическую активность материала как в реакции фотодегградации кофеина, так и в реакции фотодегградации метилового оранжевого.

Как показано в ряде работ [13–15], фотокаталитическая активность зависит от времени рекомбинации фотогенерируемой пары электрон–дырка. Для определения времени рекомбинации пар электрон–дырка был использован метод кинетической флуоресцентной спектроскопии. Время затухания фотолюминесценции, по величине которого можно судить об эффективности сепарации фотоиндуцированных электронов и дырок, для различных фотокатализаторов также представлено в таблице.

Сравнение времен затухания немодифицированного оксида цинка ($\tau_{\text{fl}} = 5,02$ нс) и оксида цинка, допированного наночастицами серебра ($\tau_{\text{fl}} = 3,74$ нс), свидетельствует о том, что процессы рекомбинации проходят быстрее при наличии серебряных наночастиц. С другой стороны, плазменная обработка как химически немодифицированного окси-

да цинка (ZnO-DBD-25), так и оксида цинка с наночастицами серебра (Ag/ZnO-DBD-25 и Ag/ZnO-DBD-15) приводит к увеличению времени рекомбинации. В первом случае время рекомбинации увеличивается с $\tau_{\text{fl}} = 5,02$ для ZnO до $\tau_{\text{fl}} = 5,61$ нс для ZnO-DBD-25, во втором — с $\tau_{\text{fl}} = 3,28$ для Ag/ZnO до $\tau_{\text{fl}} = 3,86$ нс для Ag/ZnO-DBD-25 и 13,34 нс для Ag/ZnO-DBD-15.

Таким образом, обработка в ДБР-плазме увеличивает время рекомбинации катализаторов фотогенерированных пар электрон–дырка, что может быть одной из причин повышения их каталитической активности.

Отличия в фотокаталитической активности материалов, синтезированных или модифицированных различными способами, коррелируют с изменением их оптических свойств, что проявляется, в частности, в спектрах фотолюминесценции [16]. На рис. 1 представлены спектры возбуждения фотолюминесценции и спектры фотолюминесценции необработанного и обработанных в ДБР-плазме катализаторов.

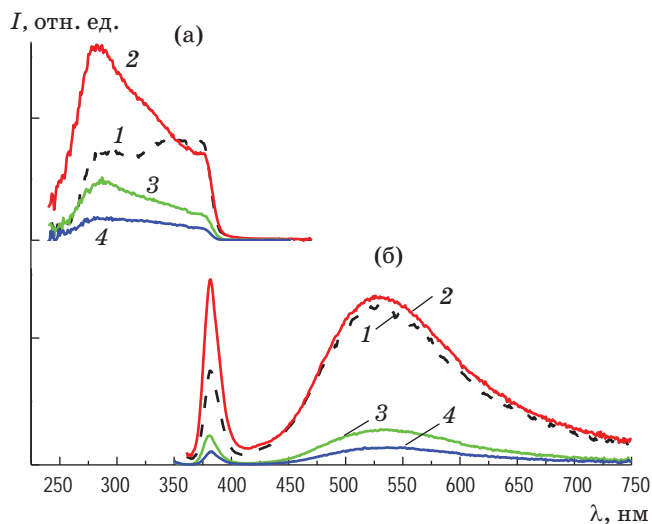


Рис. 1. Спектры возбуждения фотолюминесценции (а) и спектры фотолюминесценции (б) исходного материала ZnO до (кривая 1) и после (кривая 2) воздействия плазмы с нанесёнными на его поверхность наночастицами серебра до (кривая 3) и после (кривая 4) плазменной обработки

Fig. 1. Photoluminescence excitation spectra (a) and photoluminescence spectra (б) of the bare material ZnO before (curve 1) and after (curve 2) plasma treatment, ZnO with silver nanoparticles deposited on its surface before (curve 3) and after (curve 4) plasma treatment

Спектры возбуждения фотолюминесценции получены при регистрации на длине волны 550 нм. Спектр возбуждения необработанного образца ZnO имеет два неярко выраженных максимума вблизи длин волн 290 нм и 350 нм. В спектре возбуждения ZnO после плазменной обработки наблюдается один резко выраженный максимум. Регистрация спектров фотолюминесценции проводилась при возбуждении на длине волны 330 нм.

В спектрах люминесценции ZnO наблюдаются два максимума: один из них в ближней ультрафиолетовой области с максимумом вблизи 385 нм, второй — в видимой области вблизи 530 нм. Максимум в области 385 нм (прямой межзонный переход) связан с экситонной рекомбинацией и относится к ближнему краю излучению вблизи запрещённой зоны [17, 18]. Фотолюминесценция в видимой области вызвана рекомбинацией фотоиндуцированных электронов и дырок через уровни, лежащие в запрещённой зоне и определяемые наличием дефектов, связанных с вакансиями кислорода или цинка. При этом люминесценция в синей области (приблизительно около 435 нм) связана с наличием дефектов, обусловленных наличием цинка в междоузлиях. Фотолюминесценция в области 500–550 нм связана с переходами с донорных уровней, образованных вакансиями кислорода и с поверхностными дефектами [19–21].

Как видно из рис. 1, обработка в плазме приводит к тому, что отношение интенсивности сигнала фотолюминесценции в ближней УФ области к интенсивности сигнала в видимой области ($I_{\text{NBE}}/I_{\text{DL}}$) возрастает почти в 2 раза: до плазменной обработки величина $I_{\text{NBE}}/I_{\text{DL}} = 0,59$, после — $I_{\text{NBE}}/I_{\text{DL}} = 1,1$. Для образцов, допированных серебром $I_{\text{NBE}}/I_{\text{DL}} = 0,8$. Обработка в плазме этих образцов не изменила соотношение сигналов.

Подавление излучения в видимой области может быть связано с уменьшением дефектов, что, в свою очередь, является причиной повышения фотокаталитической активности образцов, обработанных в плазме диэлектрического барьерного разряда.

Связь интенсивности фотолюминесценции в видимой области и фотокаталитической активности гибридных полупроводниковых катализаторов определяется в большой степени свойствами допирующих атомов и структуры

катализатора и не является однозначной: в некоторых случаях может наблюдаться уменьшение люминесценции при повышении фотокаталитической активности, в других, наоборот, повышение активности катализатора может сопровождаться повышением интенсивности фотолюминесценции [20].

Увеличение отношения сигналов $I_{\text{NBE}}/I_{\text{DL}}$ после нанесения наночастиц серебра может быть связано с переносом электронов из примесных уровней на уровень Ферми наночастицы с последующим переходом из уровня Ферми наночастицы в зону проводимости ZnO [22, 23]. Энергии примесных уровней в ZnO и уровень Ферми Ag близки (–4,99 эВ и –4,7 эВ соответственно) [22, 24].

Таким образом, увеличенная концентрация электронов в зоне проводимости ведёт к повышению интенсивности фотолюминесценции I_{NBE} в УФ диапазоне.

Для установления закономерностей влияния плазмы ДБР на морфологию Ag-НЧ рассмотрим результаты исследований спектров поглощения и АСМ (рис. 2, 3).

Из рис. 2 видно, что спектр оптической плотности исходной плёнки представляет собой две широкие полосы с максимумами вблизи 415 и 730 нм. Данная форма спектра оптической плотности типична для плёнок, полученных путём осаждения Ag-НЧ из гидрозоля серебра [25–27]. Коротковолновая полоса спектра связана с локализованным плазмонным резонансом (ЛПР) в Ag-НЧ, а длинноволновая обусловлена поглощением агрегатов (агломератов) НЧ. Отношение интенсивности данных полос, таким образом, отражает относительный вклад агломератов в оптический спектр поглощения плёнки Ag-НЧ на кварцевой пластинке.

На рис. 2б видно, что вклад агломератов в спектр поглощения плавно уменьшается по мере увеличения дозы облучения плёнки плазмой ДБР. В целом, вероятно, в структуре плёнки Ag-НЧ при её облучении плазмой ДБР происходят сложные процессы, что отражается в спектрах поглощения. Например, с увеличением дозы облучения интенсивность обеих плазмонных полос спектра поглощения плёнки заметно уменьшается. Особо отметим, что в процессе плазменной обработки отношение S_{730}/S_{415} уменьшается и достигает минимума при энергии $E_{\text{eff}} \approx 22000$ Дж. При таком зна-

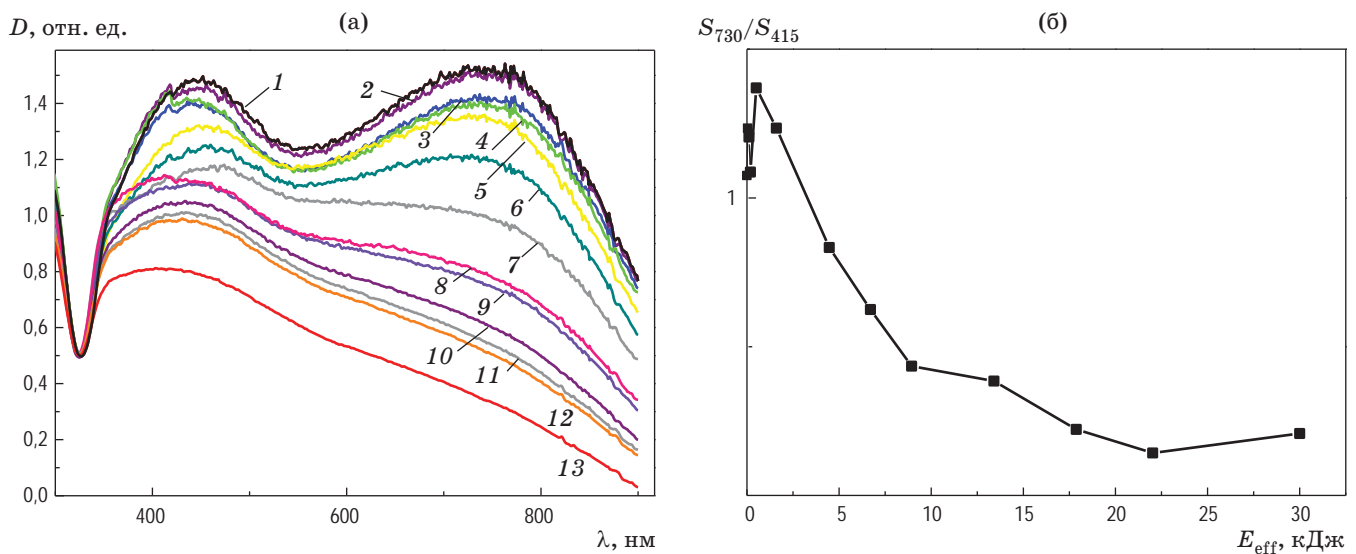


Рис. 2. Спектры поглощения (а) плёнки Ag-НЧ на кварцевой пластинке до и после обработки в плазме ДБР при различных значениях $E_{\text{eff}} = 0$ Дж (1); 37 Дж (2); 111 Дж (3); 186 Дж (4); 505 Дж (5); 1595 Дж (6); 4468 Дж (7); 6702 Дж (8); 8936 Дж (9); 13404 Дж (10); 17872 Дж (11); 22021 Дж (12); 30000 Дж (13) и соотношение площадей (б) под полосами поглощения с максимумами вблизи 415 и 730 нм в зависимости от энергии E_{eff}

Fig. 2. Absorption spectra (a) of an Ag-NP film on a quartz plate before and after treatment in DBR plasma at different values of $E_{\text{eff}} = 0$ J (1); 37 J (2); 111 J (3); 186 J (4); 505 J (5); 1595 J (6); 4468 J (7); 6702 J (8); 8936 J (9); 13404 J (10); 17872 J (11); 22021 J (12); 30000 J (13) and the ratio of the areas under the absorption bands with maxima near 415 and 730 nm depending on the E_{eff} (b)

чений E_{eff} доминирующий вклад в образование спектра поглощения вносят локализованные плазмоны плёнки Ag-НЧ.

Заметное уменьшение количества агломератов при облучении плёнки Ag-НЧ плазмой ДБР, свидетельствует о том, что связь между наночастицами в агломерате является слабой и после воздействия на них плазмы она разрывается, агломераты разрушаются. Вероятно, данный процесс отражается на активности гибридных Ag/ZnO-фотокатализаторов. Можно предположить, что активность фотокатализаторов в реакциях фоторазрушения кофеина и метилового оранжевого зависит от наличия и концентрации агломератов Ag-НЧ. При этом их формирование является фактором, ингибирующим фотокатализ, а мономерные Ag-НЧ, напротив, усиливают каталитическое действие ZnO-микрочастиц. Учитывая, что при облучении плазмой ДБР повышение каталитической активности гибридных Ag/ZnO-фотокатализаторов одновременно отражается на увеличении среднего времени флуоресценции ZnO, можно сделать вывод, что фактор времени жизни фотогенерируемых носителей

заряда является важным параметром, определяющим их каталитическую активность, что отмечалось также в работах других авторов [13–15].

Данная интерпретация спектров поглощения исследуемых образцов подтверждается данными АСМ-изображений (рис. 3) и их статистическим анализом (рис. 4).

Из рис. 3 видно, что на поверхности необработанного образца наблюдаются многочисленные разновеликие агломераты (рис. 3а). Плазменная обработка при значении $E_{\text{eff}} = 111$ Дж приводит к частичному разрушению агломератов и появлению участков поверхности образца с относительно большим числом изолированных наночастиц (рис. 3б). Однако полного разрушения агломератов не происходит даже при увеличении значения E_{eff} до 745 Дж (рис. 3в). Такой же вывод можно сделать на основании анализа относительной интенсивности полосы в области 730 нм спектра поглощения плёнки Ag-НЧ (рис. 2).

Как видно из рис. 4, на поверхности образца, обработанного при $E_{\text{eff}} = 111$ Дж, наблюдаются частицы диаметром от 5 до 800 нм.

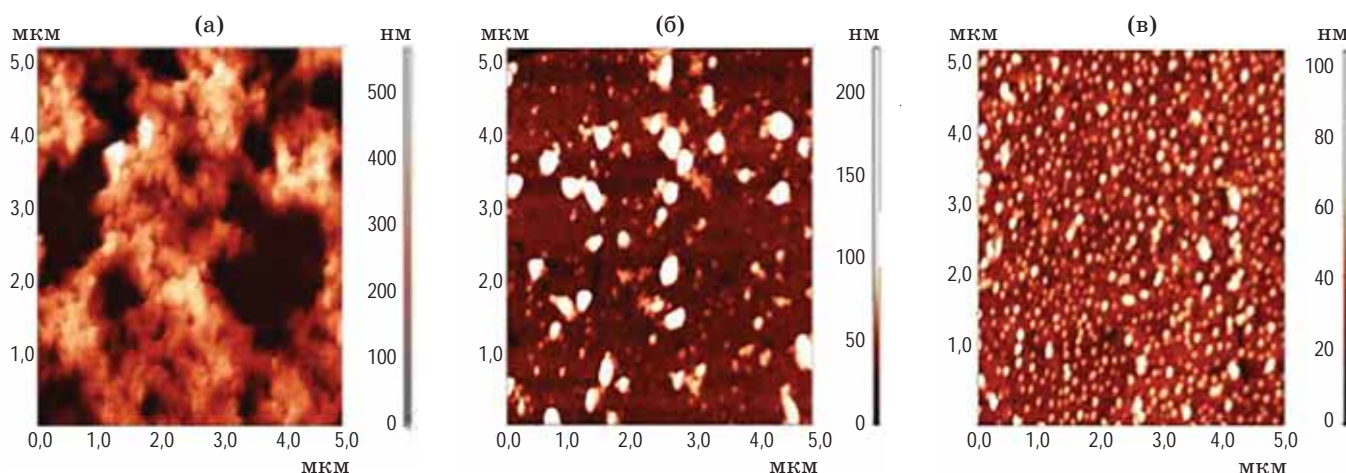


Рис. 3. 2D-АСМ изображения образцов Ag-НЧ, необработанных (а) и обработанных в плазме ДБР при различных значениях $E_{\text{eff}} = 111$ Дж (б), 745 Дж (в)

Fig. 3. 2D-AFM images of Ag-NP samples, untreated (a) and treated in DBR plasma at different $E_{\text{eff}} = 111$ J (б), 745 J (в)

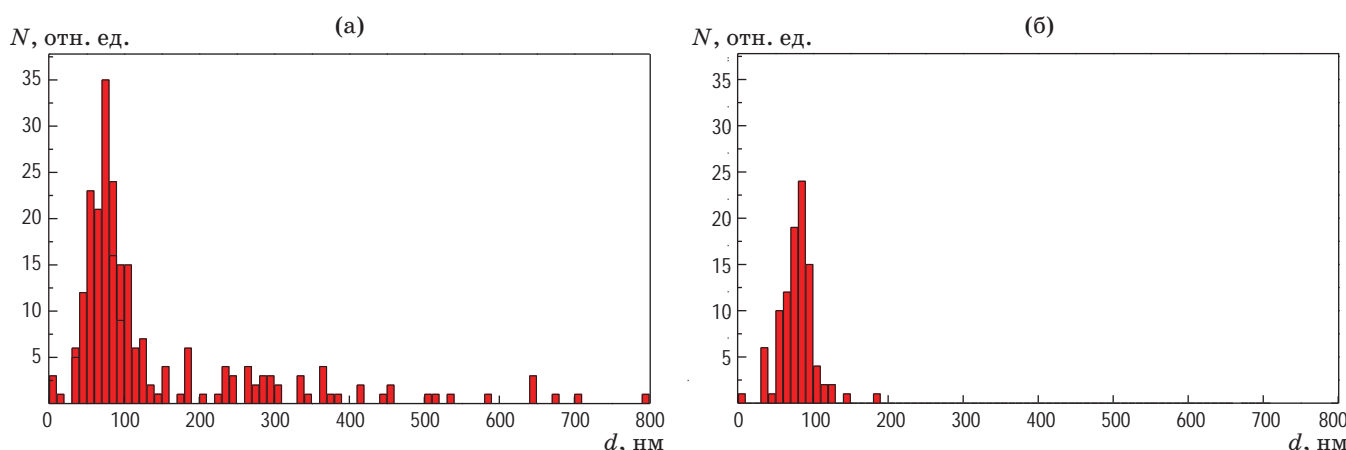


Рис. 4. Распределения наночастиц серебра по размерам после обработки в плазме диэлектрического барьерного разряда при эффективной энергии $E_{\text{eff}} = 111$ Дж (а) и 745 Дж (б)

Fig. 4. Size distributions of silver nanoparticles after treatment in a dielectric barrier discharge plasma at effective energy $E_{\text{eff}} = 111$ (a) and 745 J (б)

Средний диаметр частиц составляет 145 нм. При увеличении E_{eff} средний диаметр наночастиц уменьшается до 80 нм. При этом на поверхности образца не наблюдаются частицы диаметром больше 180 нм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании исследования кинетики реакции фотодеградации метилового оранжевого в присутствии обработанных в ДБР-плазме катализаторов на основе ZnO установлено, что использование плазмы диэ-

лектрического барьерного разряда является эффективным способом повышения фотокаталитической активности материалов на основе ZnO.

На основании анализа соотношения интенсивностей полос в спектрах фотолуминесценции установлено, что одной из причин повышения каталитической активности обработанных в ДБР-плазме катализаторов на основе ZnO является уменьшение дефектов на поверхности материала.

Повышение фотокаталитической активности гибридных фотокатализаторов в реакци-

ях фотодеградация метилового оранжевого и кофеина после их обработки в плазме диэлектрического барьерного разряда обусловлено разрушением в результате плазменной

обработки агломератов наночастиц серебра и увеличением среднего времени излучательной рекомбинации участвующих в реакциях фотодеградация зарядов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Liu Y., Dai X., Li J., Cheng Sh., Zhanga J., Ma Y. Recent progress in TiO₂-biochar-based photocatalysts for water contaminants treatment: strategies to improve photocatalytic performance // RSC Adv. 2024. V. 14. P. 478–491. <https://doi.org/10.1039/d3ra06910a>
- Zhang Y., Ju Sh., Casals Gr., Tang J., Lin Y., Li X., Liang L., Jia Zh., Zeng M., Casals E. Facile aqueous synthesis and comparative evaluation of TiO₂-semiconductor and TiO₂-metal nanohybrid photocatalysts in antibiotics degradation under visible light // RSC Adv. 2023. V. 13. № 47. P. 33187–33203. <https://doi.org/10.1039/d3ra06231g>
- Navidpour A.H., Hosseinzadeh A., Zhou J., Huang Zh. Progress in the application of surface engineering methods in immobilizing TiO₂ and ZnO coatings for environmental photocatalysis // Catalysis Reviews. 2021. V. 65. № 1. P. 822–873. <https://doi.org/10.1080/01614940.2021.1983066>
- Elhalil A., Elmoubarki R., Sadiq M'h., Abdennouri M., Kadmi Ya., Favier L., Qourzal S., Barka N. Enhanced photocatalytic degradation of caffeine as a model pharmaceutical pollutant by Ag-ZnO-Al₂O₃ nanocomposite // Desalination and Water Treatment. 2017. V. 94. P. 254–262. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21587>
- Savastenko N.A., Filatova I.I., Lyushkevich V.A., Chubrik N.I., Brüser V., Shcherbovich A.A., Maskevich S.A. Effect of impregnation by silver nanoparticles on the efficiency of plasma-treated ZnO-based catalysts // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 2020. V. 24. № 1. P. 21–45. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2020033434>
- Savastenko N.A., Shcherbovich A.A., Filatova I.I., Lyushkevich V.A., Maskevich S.A. Effect of DBD-plasma treatment on activity of ZnO-based photocatalysts impregnated with silver nanoparticles // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 2022. V. 26. № 6. P. 25–42. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2022042454>
- Wagner E., Brandenburg R., Kozlov K.V., Sonnenfeld A., Michel P., Behnke J.F. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment // Vacuum. 2003. V. 71. № 3. P. 417–436. [https://doi.org/10.1016/S0042207X\(02\)00765-0](https://doi.org/10.1016/S0042207X(02)00765-0)
- Lee P.C., Meisel D. Adsorption and surface enhanced Raman of dyes on silver and gold solutions // J. Phys. Chemistry. 1982. V. 86. Iss. 17. P. 3391–3395.
- Сергеев Б.М., Кирюхин М.В., Прусов А.Н., Сергеев В.Г. Получение наночастиц серебра в водных растворах полиакриловой кислоты // Вестн. моск. ун-та. Сер. Химия. 1999. Т. 40. № 2. P. 123–133.
- Маскевич А.А., Ступуро В.И., Кургузенков С.А., Лавыш А.В. Комплекс аппаратных и программных средств для исследования кинетики затухания флуоресценции // Вестник ГрДзУ. Сер. 2. 2013. № 3 (159). С. 107–119.
- O'Connor D.V., Phillips D. Time-correlated single-photon counting. New York: Academic Press, 1984. 288 p.
- Маскевич А.А., Ступуро В.И., Балинский П.Т. Анализ кинетики затухания флуоресценции тиофлавина Т методом максимума энтропии // Журнал прикладной спектроскопии. 2010. Т. 77. № 2. С. 209–217.

REFERENCES

- Liu Y., Dai X., Li J., Cheng Sh., Zhanga J., Ma Y. Recent progress in TiO₂-biochar-based photocatalysts for water contaminants treatment: strategies to improve photocatalytic performance // RSC Adv. 2024. V. 14. P. 478–491. <https://doi.org/10.1039/d3ra06910a>
- Zhang Y., Ju Sh., Casals Gr., Tang J., Lin Y., Li X., Liang L., Jia Zh., Zeng M., Casals E. Facile aqueous synthesis and comparative evaluation of TiO₂-semiconductor and TiO₂-metal nanohybrid photocatalysts in antibiotics degradation under visible light // RSC Adv. 2023. V. 13. № 47. P. 33187–33203. <https://doi.org/10.1039/d3ra06231g>
- Navidpour A.H., Hosseinzadeh A., Zhou J., Huang Zh. Progress in the application of surface engineering methods in immobilizing TiO₂ and ZnO coatings for environmental photocatalysis // Catalysis Reviews. 2021. V. 65. № 1. P. 822–873. <https://doi.org/10.1080/01614940.2021.1983066>
- Elhalil A., Elmoubarki R., Sadiq M'h., Abdennouri M., Kadmi Ya., Favier L., Qourzal S., Barka N. Enhanced photocatalytic degradation of caffeine as a model pharmaceutical pollutant by Ag-ZnO-Al₂O₃ nanocomposite // Desalination and Water Treatment. 2017. V. 94. P. 254–262. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21587>
- Savastenko N.A., Filatova I.I., Lyushkevich V.A., Chubrik N.I., Brüser V., Shcherbovich A.A., Maskevich S.A. Effect of impregnation by silver nanoparticles on the efficiency of plasma-treated ZnO-based catalysts // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 2020. V. 24. № 1. P. 21–45. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2020033434>
- Savastenko N.A., Shcherbovich A.A., Filatova I.I., Lyushkevich V.A., Maskevich S.A. Effect of DBD-plasma treatment on activity of ZnO-based photocatalysts impregnated with silver nanoparticles // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 2022. V. 26. № 6. P. 25–42. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2022042454>
- Wagner E., Brandenburg R., Kozlov K.V., Sonnenfeld A., Michel P., Behnke J.F. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment // Vacuum. 2003. V. 71. № 3. P. 417–436. [https://doi.org/10.1016/S0042207X\(02\)00765-0](https://doi.org/10.1016/S0042207X(02)00765-0)
- Lee P.C., Meisel D. Adsorption and surface enhanced Raman of dyes on silver and gold solutions // J. Phys. Chemistry. 1982. V. 86. Iss. 17. P. 3391–3395.
- Sergeev B.M., Kiryukhin M.V., Prusov A.N., Sergeev V.G. Preparation of silver nanoparticles in aqueous solutions of polyacrylic acid // Vestnik of Moscow State University. Series Chemistry (in Russian). 1999. № 2. P. 123–133.
- Maskevich A., Stsiapura V., Kurguzenkov S., Laviash A. Hardware and software complex for fluorescence decay studies // Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 2 (in Russian). 2013. № 3 (159). P. 107–119.
- O'Connor D.V., Phillips D. Time-correlated single-photon counting. New York: Academic Press, 1984. 288 p.
- Maskevich A., Stsiapura V., Balinski P. Analysis of fluorescence decay kinetics of thioflavin T by a maximum entropy method // J. Appl. Spectrosc. 2010. V. 77. № 2. P. 194–201.

13. Kansal S.K., Singh M., Sud D. Studies on photodegradation of two commercial dyes in aqueous phase using different photocatalysts // *J. Hazard. Mater.* 2007. V. 141. № 3. P. 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.035>
14. Moore C.J., Louder R., Thompson V.C. Photocatalytic activity and stability of porous polycrystalline ZnO thin-films grown via a two-step thermal oxidation process // *Coatings*. 2014. V. 4. № 3. P. 651–669. <https://doi.org/10.3390/coatings4030651>
15. Brüninghoff R., Wenderich K., Korterik J.P. et al. Time-dependent photoluminescence of nanostructured anatase TiO₂ and the role of bulk and surface processes // *J. Phys. Chem. C*. 2019. V. 123. № 43. P. 6653–26661. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.9b06890>
16. Liqiang J., Yichun Q., Baiqi W., Shudan L., Baojiang J., Libin Y., Wei F., Honggang F., Jiazhong S. Review of photoluminescence performance of nano-sized semiconductor materials and its relationships with photocatalytic activity // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. V. 90. P. 1773–1787. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.11.007>
17. Li Y., Uchino R., Tokizono T., Paulsen A., Zhong M., Shuzo M., Yamada I., Delaunay J.-J. Effect of hydrogen plasma treatment on the luminescence and photoconductive properties of ZnO nanowires // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2010. V. 1206. P. 1206-M13-03P1–1206-M13-03P6. <https://doi.org/10.1557/PROC-1206-M13-03>
18. Горохова Е.И., Еронько С.Б., Орещенко Е.А., Родный П.А., Веневцев И.Д., Кульков А.М., Сухаржевская Е.С. Структурные, оптические и люминесцентные свойства ZnO:Er-керамики // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 12. С. 83–90. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-12-83-90>
19. Sans J.A., Segura A., Mollar M., Mari B. Optical properties of thin films of ZnO prepared by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. 2004. V. 453. P. 251–255. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.155>
20. Liu X., Wu X., Cao H., Chang R.P.H. Growth mechanism and properties of ZnO nanorods synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 95. P. 3141–3147. <https://doi.org/10.1063/1.1646440>
21. Shalish I., Temkin H., Narayanamurti V. Size-dependent surface luminescence in ZnO nanowires // *Phys. Rev. B*. 2004. V. 69. P. 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.245401>
22. Park S., An S., Mun Y. et al. Enhanced luminescence of Ag-decorated ZnO nanorods // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2013. V. 24. № 12. P. 4906–4912. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/17/017>
23. Lin J.M., Lin H.Y., Cheng Ch.L., Chen Ya.F. Giant enhancement of bandgap emission of ZnO nanorods by platinum nanoparticles // *Nanotechnol.* 2006. V. 17. № 17. P. 4391. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/17/017>
24. Cheng C.W., Sie E.J., Liu B. et al. Surface plasmon enhanced band edge luminescence of ZnO nanorods by capping Au nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. № 7. P. 071107. <https://doi.org/10.1063/1.3323091>
25. Сидоров А.И. Двойной плазмонный резонанс в сферических наноструктурах // *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76. № 4. P. 86–90.
26. Sastry M., Mayya K.S., Bandyopadhyay K. PH dependent changes in the optical properties of carboxylic acid derivatized silver colloidal particles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1997. V. 127. № 1–3. P. 221–228. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(97\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(97)00087-3)
13. Kansal S.K., Singh M., Sud D. Studies on photodegradation of two commercial dyes in aqueous phase using different photocatalysts // *J. Hazard. Mater.* 2007. V. 141. № 3. P. 581–590. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.035>
14. Moore C.J., Louder R., Thompson V.C. Photocatalytic activity and stability of porous polycrystalline ZnO thin-films grown via a two-step thermal oxidation process // *Coatings*. 2014. V. 4. № 3. P. 651–669. <https://doi.org/10.3390/coatings4030651>
15. Brüninghoff R., Wenderich K., Korterik J.P. et al. Time-dependent photoluminescence of nanostructured anatase TiO₂ and the role of bulk and surface processes // *J. Phys. Chem. C*. 2019. V. 123. № 43. P. 6653–26661. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.9b06890>
16. Liqiang J., Yichun Q., Baiqi W., Shudan L., Baojiang J., Libin Y., Wei F., Honggang F., Jiazhong S. Review of photoluminescence performance of nano-sized semiconductor materials and its relationships with photocatalytic activity // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. V. 90. P. 1773–1787. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.11.007>
17. Li Y., Uchino R., Tokizono T., Paulsen A., Zhong M., Shuzo M., Yamada I., Delaunay J.-J. Effect of hydrogen plasma treatment on the luminescence and photoconductive properties of ZnO nanowires // *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 2010. V. 1206. P. 1206-M13-03P1–1206-M13-03P6. <https://doi.org/10.1557/PROC-1206-M13-03>
18. Gorokhova E.I., Eron'ko S.B., Oreshchenko E.A., Rodnyi P.A., Venevtsev I.D., Kul'kov A.M., Sukharzhevskaya E.S. Structural, optical, and luminescence properties of ZnO:Er ceramic // *Journal of Optical Technology*. 2019. V. 86(12). P. 814–819. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000814>
19. Sans J.A., Segura A., Mollar M., Mari B. Optical properties of thin films of ZnO prepared by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. 2004. V. 453. P. 251–255. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.155>
20. Liu X., Wu X., Cao H., Chang R.P.H. Growth mechanism and properties of ZnO nanorods synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition // *J. Appl. Phys.* 2004. V. 95. P. 3141–3147. <https://doi.org/10.1063/1.1646440>
21. Shalish I., Temkin H., Narayanamurti V. Size-dependent surface luminescence in ZnO nanowires // *Phys. Rev. B*. 2004. V. 69. P. 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.245401>
22. Park S., An S., Mun Y. et al. Enhanced luminescence of Ag-decorated ZnO nanorods // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2013. V. 24. № 12. P. 4906–4912. <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1496-4>
23. Lin J.M., Lin H.Y., Cheng Ch.L., Chen Ya.F. Giant enhancement of bandgap emission of ZnO nanorods by platinum nanoparticles // *Nanotechnol.* 2006. V. 17. № 17. P. 4391. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/17/017>
24. Cheng C.W., Sie E.J., Liu B. et al. Surface plasmon enhanced band edge luminescence of ZnO nanorods by capping Au nanoparticles // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. № 7. P. 071107. <https://doi.org/10.1063/1.3323091>
25. Sidorov A.I. Double plasmon resonance in spherical nanostructures // *J. of Technical Physics (in Russian)*. 2006. V. 76. № 4. P. 86–90.
26. Sastry M., Mayya K.S., Bandyopadhyay K. PH dependent changes in the optical properties of carboxylic acid derivatized silver colloidal particles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1997. V. 127. № 1–3. P. 221–228. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(97\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(97)00087-3)

27. Gorham J.M., Rohlfing A.B., Lippa K.A., MacCuspie R.I., Hemmati A., Holbrook R.D. Storage wars: how citrate-capped silver nanoparticle suspensions are affected by not-so-trivial decisions // *J. Nanopart. Res.* 2014. V. 16. P. 2339–2353. <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2339-9>

АВТОРЫ

Наталья Александровна Савастенко — канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой общей и медицинской физики учреждения образования «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, 220070, Минск, Республика Беларусь; Scopus ID: 6506108224; <https://orcid.org/0000-0003-4039-2515>; nataliesavastenko@iseu.by

Анастасия Алексеевна Щербович — преподаватель учреждения образования «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, 220070, Минск, Республика Беларусь; Scopus ID: 6506108224; <https://orcid.org/0000-0002-4401-1110>; scherbovich.a.a@gmail.com

Вероника Александровна Люшкевич — научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова Национальной Академии наук Беларуси, 220072, Минск, Республика Беларусь; <https://orcid.org/0000-0001-8592-4373>; v.lyushkevich@ifanbel.bas-net.by

Ирина Ивановна Филатова — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник государственного научного учреждения «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» (Институт физики НАН Беларуси); учёный секретарь Отделения физики, математики и информатики НАН Беларуси; 220072, Минск, Беларусь; Scopus ID: 7004246100; <https://orcid.org/0000-0002-3875-6466>; filatova@presidium.bas-net.by

Сергей Александрович Маскевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, почётный профессор учреждения образования «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, 220070, Минск, Республика Беларусь; Scopus ID: 6603677403; <https://orcid.org/0000-0001-7644-4968>; MaskevichSA@bsu.by; maskevich.sergei@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.02.2024
Одобрена после рецензирования 27.02.2024
Принята к печати 29.04.2024

27. Gorham J.M., Rohlfing A.B., Lippa K.A., MacCuspie R.I., Hemmati A., Holbrook R.D. Storage Wars: how citrate-capped silver nanoparticle suspensions are affected by not-so-trivial decisions // *J. Nanopart. Res.* 2014. V. 16. P. 2339–2353. <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2339-9>

AUTHORS

Natalie A. Savastenko — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Department of General and Medical Physics, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, 220070, Minsk, Republic of Belarus; Scopus ID: 6506108224; <https://orcid.org/0000-0003-4039-2515>; nataliesavastenko@iseu.by

Anastasiya A. Scherbovich — Teacher, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, 220070, Minsk, Republic of Belarus; Scopus ID: 6506108224; <https://orcid.org/0000-0002-4401-1110>; scherbovich.a.a@gmail.com

Veronika A. Lyushkevich — Researcher of B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072, Minsk, Belarus; <https://orcid.org/0000-0001-8592-4373>; v.lyushkevich@ifanbel.bas-net.by

Irina Filatova — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher of B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences; Scientific Secretary of the Department of Physics, Mathematics and Informatics of NAS of Belarus; 220072, Minsk, Belarus; Scopus ID: 7004246100; <https://orcid.org/0000-0002-3875-6466>; filatova@presidium.bas-net.by

Sergei A. Maskevich — D.Sci. in Physics and Mathematics, Full Professor, Professor Emeritus of International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, 220070, Minsk, Republic of Belarus; Scopus ID: 6603677403; <https://orcid.org/0000-0001-7644-4968>; MaskevichSA@bsu.by; maskevich.sergei@gmail.com

The article was submitted to the editorial office 08.02.2024
Approved after review 27.02.2024
Accepted for publication 29.04.2024