

Научная статья

УДК 546.05

doi: 10.17223/7783494/1/11

Электровзрывной синтез наночастиц ZnO-Ag с высокой антибактериальной активностью

Ольга Владимировна Бакина¹, Елена Алексеевна Глазкова²,
Наталья Валентиновна Сваровская³, Александр Максимович Волков⁴,
Александр Борисович Ворожцов⁵, Марат Израильевич Лернер⁶

^{1, 2, 3, 6} *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

⁴ *Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия*

^{5, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *ovbakina@ispms.ru*

² *eagl@ispms.tsc.ru*

³ *nsvs@ispms.tsc.ru*

⁴ *sancho_poncho@mail.ru*

⁵ *abv1953@mail.ru*

⁶ *lerner@ispms.tsc.ru*

Аннотация. Статья посвящена синтезу янус-наночастиц ZnO-Ag электрическим взрывом двух проволок в кислородосодержащей атмосфере. Установлено, что смещение полосы поглощения ZnO-Ag по сравнению с ZnO в видимую область спектра способствует более высокой фотохимической активности наночастиц при облучении видимым светом. Наночастицы ZnO-Ag проявляли высокую антибактериальную активность в отношении модельных и госпитальных штаммов, которая была выше или сравнима с препаратами на основе наночастиц серебра.

Ключевые слова: электрический взрыв проволок, наночастицы ZnO-Ag, фотокатализаторы, бикомпонентные наночастицы, антибактериальные наночастицы

Благодарности: исследование выполнено за счет проекта государственного задания ИФПМ СО РАН FWRW-2021-0007.

Для цитирования: Бакина О.В., Глазкова Е.А., Сваровская Н.В., Волков А.М., Ворожцов А.Б., Лернер М.И. Электровзрывной синтез наночастиц ZnO-Ag с высокой антибактериальной активностью // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 82–90. doi: 10.17223/7783494/1/11

Original article

doi: 10.17223/7783494/1/11

Electroexplosive synthesis of ZnO-Ag nanoparticles with high antibacterial activity

Olga V. Bakina¹, Elena A. Glazkova², Natalia V. Svarovskaya³,
Alexandr M. Volkov⁴, Alexandr B. Vorozhtsov⁵, Marat I. Lerner⁶

^{1, 2, 3, 6} *Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

⁴ *Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation*

^{5, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *ovbakina@ispms.ru*

² *eagl@ispms.tsc.ru*

³ *nsvs@ispms.tsc.ru*

⁴ *sancho_poncho@mail.ru*

⁵ *abv1953@mail.ru*

⁶ *lerner@ispms.tsc.ru*

Abstract. The article describes the synthesis of Janus-like ZnO-Ag nanoparticles by electric explosion of two wires in an oxygen-containing atmosphere. The higher photochemical activity of nanoparticles under visible light irradiation is due to the shift of the optical absorption band edge of ZnO-Ag nanoparticles compared to ZnO nanoparticles. ZnO-Ag nanoparticles showed high antibacterial activity against standard and hospital strains. The antibacterial activity of the nanoparticles was higher or comparable to colloidal silver nanoparticles.

Keywords: electrical explosion of wires, ZnO-Ag nanoparticles, photocatalysts, bicomponent nanoparticles, antibacterial nanoparticles

Acknowledgments: The study is funded by the Government research assignment for ISPMS SB RAS, project FWRW-2021-0007.

For citation: Bakina, O.V., Glazkova, E.A., Svarovskaya, N.V., Volkov, A.M., Vorozhtsov, A.B. & Lerner, M.I. (2023) Electroexplosive synthesis of ZnO-Ag nanoparticles with high antibacterial activity. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 82–90. doi: 10.17223/7783494/1/11 (In Russian).

Введение

В настоящее время проблема распространения нозокомиальных инфекций до сих пор остается актуальной, несмотря на стремительное развитие науки и технологий. По данным отчета Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире от бактериальных инфекций погибает свыше 700 тыс. чел., что связано, в первую очередь, с нарушением мероприятий по локализации и предотвращению внутрибольничных инфекций. В связи с этим создание антимикробных композиционных материалов и покрытий, содержащих активные наночастицы, в настоящее время является перспективным и наиболее интенсивно развивающимся направлением индустрии наносистем.

Анализ механизмов взаимодействия наночастиц (НЧ) с бактериальной клеткой показывает, что антимикробные частицы должны обладать положительным зарядом поверхности для улучшения адгезии к бактериальным клеткам [1,2], способностью генерировать ионы [3] или активные формы кислорода [4].

Обобщение данных о минимальных подавляющих концентрациях (МПК) наночастиц в отношении основных патогенов возбудителей гнойных инфекций, приведенное в обзоре [5], показало, что наибольшей активностью обладают НЧ серебра. Значения МПК(Ag) в отношении бактерий *E. coli* составили по различным данным от 40 до 230 мкг/мл, MRSA – от 10 до 212 мкг/мл, *S. aureus* и *P. aeruginosa* – от 40 до 50 мкг/мл. Значения МПК НЧ меди и оксида меди в отношении исследованных штаммов превышали 2500 мкг/мл, НЧ ZnO ингибируют рост бактерий при концентрациях выше 40 мкг/мл.

Оксид цинка ZnO представляет собой полупроводник *n*-типа, характеризуется высокой химической стабильностью, улучшенными фотоэлектронными свойствами, антимикробной активностью, низкой токсичностью и невысокой стоимостью [6]. Среди многих других полупроводников ZnO является наиболее многообещающим генератором активных форм кислорода (АФК). Большим преимуществом является то, что ZnO поглощает свет в УФ- и видимой области. Кроме того, ZnO имеет более высокую подвижность носителей заряда и большее время жизни электронов по сравнению,

например, с TiO₂ [7], в связи с чем считается перспективным материалом для использования в устройствах преобразования солнечной энергии [8]. Высокая активность наночастиц ZnO, обладающих низкой токсичностью, обеспечивается их способностью генерировать АФК, которые вызывают перекисное окисление липидов, разрушение или модификацию белков, разрушение ферментов и повреждение молекул рибонуклеиновой кислоты, приводящие к гибели клеток.

Модификация наночастиц ZnO другими элементами перспективна для улучшения его оптических, электрических и антибактериальных свойств. Согласно недавно опубликованным данным, импрегнация фотокатализаторов благородными металлами, в частности, наночастицами серебра, приводила к улучшению фотокаталитических характеристик разложения нитросоединений и других загрязняющих веществ [9,10]. Этот эффект обусловлен эффективным разделением заряда в присутствии атомов благородных металлов, в результате чего увеличивается количество активных центров. Серебро действует как сток электронов, фотоиндуцированных при облучении ZnO, а образовавшаяся дырка индуцирует образование гидроксильных радикалов для фотохимического уничтожения бактерий [11]. Кроме того, само по себе серебро эффективно ингибирует рост грамотрицательных и грамположительных бактерий. Таким образом, при сочетании Ag с ZnO может иметь место синергетический эффект, что значительно усилит антибактериальную активность материалов для широкого спектра применений. Подобные эффекты фотоиндуцированной дезинфекции наблюдались в работах [12, 13] для наночастиц Ag–ZnO, полученных химическим осаждением, в том числе методами «зеленой» химии [14–16]. Показано, что такая структура наночастиц позволяет одновременно использовать фотокаталитические свойства ZnO и плазмонные свойства Ag [17].

Таким образом, использование наночастиц ZnO-Ag дает потенциальную возможность для создания новых материалов и покрытий, активных в отношении широкого спектра микроорганизмов. Роль наноструктурного фактора может быть значительной и позволит направленно регулировать свойства материалов, привести к более эффективному подавлению

роста микроорганизмов, снизить концентрацию действующего вещества и, соответственно, его токсичность. Настоящая статья посвящена определению физико-химических и антибактериальных свойств наночастиц ZnO-Ag, синтезированных электрическим взрывом проволок из цинка и серебра.

Материалы и методы

Бикомпонентные наночастицы ZnO-Ag были синтезированы совместным электрическим взрывом двух свитых проволок из цинка и серебра в кислородсодержащей атмосфере (80% об. Ag + 20% об. O₂). Принципиальная схема установки для синтеза НЧ представлена на рис. 1 [18].

Для получения НЧ были выбраны следующие параметры электрического взрыва: диаметр проволок d_{Zn} и d_{Ag} составил 0,38 и 0,15 мм соответственно; длина проволок – 90 мм; разрядное напряжение U составило 23 кВ; емкость конденсаторов – 3,2 мкФ. Количественный состав наночастиц составлял 12% ат. Ag и 88% ат. ZnO. Ранее нами уже было по-

казано, что данное соотношение обеспечивает высокую фотохимическую и антибактериальную активность НЧ ZnO-Ag [19].

Бикомпонентные НЧ ZnO-Ag были охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии ПЭМ (JEM-2100, JEOL, Япония) с интегрированной системой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) X-Max (Oxford Instruments, Великобритания), рентгеновской дифракции с использованием $CuK\alpha$ ($\lambda = 1,514 \text{ \AA}$) излучения (XRD-6000, Shimadzu, Япония). Удельную поверхность определяли методом низкотемпературной сорбции / десорбции азота в диапазоне относительных давлений 0,05–0,35 на автоматическом анализаторе «Сорбтометр М» («Катакон», Россия). Распределение наночастиц по размерам определяли методом седиментации на дисковой центрифуге CPS DS24000 (CPS Instruments, США). Спектр поглощения наночастиц в УФ-видимой области измеряли с помощью спектрофотометра СФ-2000 (Россия), с длиной оптического пути кюветы 10 мм.

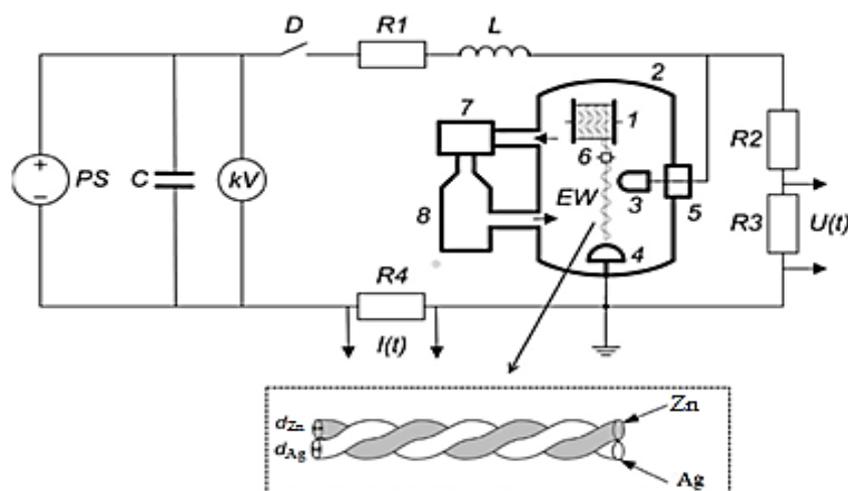


Рис. 1. Схема установки ЭВП

Fig. 1. Scheme of EEW equipment

Для исследования антибактериальной активности объектов использовали модельные штаммы *Staphylococcus aureus* (шт. ATCC № 6538-P), *Escherichia coli* (шт. ATCC № 25922) и штаммы возбудителей больничных инфекций (клинические штаммы) *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter baumannii*, *Enterococcus faecalis*, *Klebsiella pneumoniae*. Ампулы с микроорганизмами открывали в условиях ламинарного бокса и производили посев в пробирки с соответствующей питательной средой. Через 18–20 ч инкубации при температуре $37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ культуры высеивали на чашки Петри с соответствующим агаром для выделения типичных колоний. После 24 ч инкубации культуры пересевали в

пробирки с агаром Мюллера–Хинтона (НИЦФ, Россия) и выращивали 18 ± 3 ч при $37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Окончательная концентрация клеток составляла 2×10^6 КОЕ/мл. Суспензию бактерий использовали не более 30 мин после разведения для сохранения жизнеспособности клеток. Антибактериальную активность НЧ оценивали по величине минимальной концентрации, подавляющей рост исследуемых микроорганизмов (МПК). Для ее определения использовали стандартный суспензионный метод в вариации микропланшетной методики [20]. Для этого готовили суспензию НЧ в питательном бульоне Мюллера–Хинтона (Sigma, США) с концентрацией 500 мкг/мл, которую последовательно разводили в 2, 8, 16, 32, 64, 128,

256 раз тем же бульоном. В каждую лунку 96-луночного микропланшета вводили по 150 мкл бульона, 30 мкл суспензии бактерий в концентрации 10^6 КОЕ/мл и по 20 мкл суспензии НЧ выбранной концентрации. Через 24 ч инкубирования содержимое лунок высевали на чашки Петри, содержащие агар. Антибактериальную активность НЧ оценивали путем сравнения количества бактерий до и после инкубирования с НЧ. МПК определяли как минимальную концентрацию, останавливающую рост тестируемых бактерий. Все исследования проводили в трех технических повторностях.

Результаты и обсуждение

Электрический взрыв проволок происходит при температурах, превышающих энергии сублимации металлов. При температурах более $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ в инерт-

ной атмосфере, исходя из данных фазовой диаграммы системы Zn-Ag, металлы могут неограниченно растворяться друг в друге с образованием интерметаллидов. В кислородсодержащей атмосфере образование наночастиц, вероятно, происходит одновременно с окислением цинка. Оксид цинка кристаллизуется уже при $1\ 975\ ^\circ\text{C}$, а серебро с более низкой температурой плавления ($962\ ^\circ\text{C}$) вытесняется из объема образующейся частицы, что приводит к разделению компонентов. В результате образуются частицы со структурой янус-наночастиц (рис. 2). Наночастицы ZnO-Ag преимущественно огранены, однако компоненты НЧ различаются по контрасту. Как показал ЭДС-анализ (рис. 3, а), электронно-плотные фрагменты обогащены серебром, а гексагональные фрагменты обогащены цинком и кислородом, т.е. являются оксидом цинка.

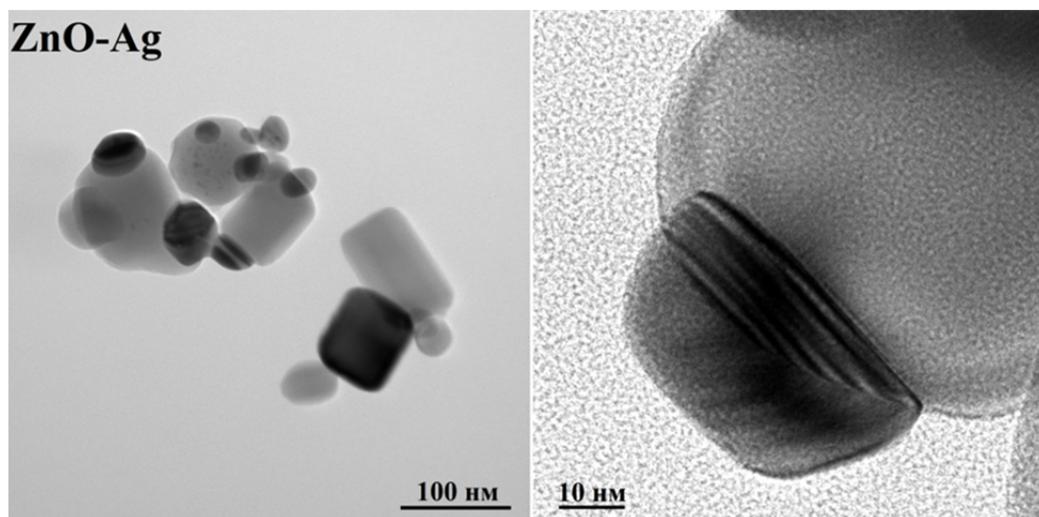


Рис. 2. ПЭМ-изображения НЧ ZnO-Ag при различном увеличении

Fig. 2. TEM image of ZnO-Ag NPs at various magnifications

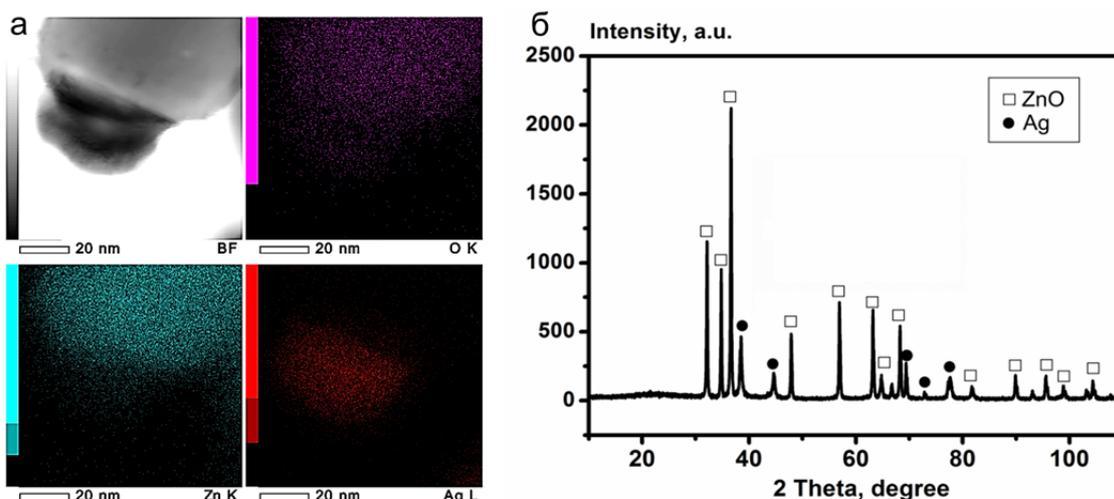


Рис. 3. ПЭМ-изображение в режиме картирования (а) и дифрактограмма (б) НЧ ZnO-Ag

Fig. 3. EDX analysis (a) and (b) diffractogram of ZnO-Ag NPs

Дифрактограмма образца (рис. 3, *b*) содержит пики, соответствующие гексагональной структуре вюрцита ZnO (карточка PDF 01-075-0576). Хорошо разрешенные дифракционные пики, расположенные при углах дифракции $2\theta = 38,2^\circ$, $44,4^\circ$, $64,6^\circ$ и $77,6^\circ$, соответствуют плоскостям (111), (200), (220) и (311) гранецентрированной кубической решетки серебра (карточка PDF 01-071-3762). Других кристаллических примесей в образце не наблюдается. Кроме того, отсутствие заметного сдвига дифракционных пиков на дифрактограмме указывает, что атомы серебра не внедрились в решетку ZnO. Усредненный размер серебросодержащих фрагментов, рассчитанный методом Уильямсона–Холла, составил 25 ± 5 нм.

Среднечисленный размер НЧ ZnO-Ag, по данным седиментационного метода, составил 66 ± 4 нм. Удельная поверхность наночастиц составила $8,2 \text{ м}^2/\text{г}$, дзета-потенциал – $12,2 \pm 0,2$ мВ.

УФ-видимые спектры водной суспензии НЧ записывали в диапазоне длин волн от 200 до 800 нм (рис. 4). Для сравнения на рисунке приведен спектр НЧ ZnO, полученных электрическим взрывом цинковой проволоки в кислородсодержащей атмосфере. Интенсивный пик поглощения при 375 нм, присутствующий в обоих спектрах, указывает на ширину запрещенной зоны объектов около 3 эВ. Однако пик поглощения образца ZnO-Ag имеет плечо со смещением края полосы поглощения до 470 нм, что говорит о снижении энергетического барьера возбуждения части электронов до 2,5 эВ. Расширение в видимую область спектров поглощения НЧ ZnO-Ag, по сравнению с наночастицами ZnO, должно способствовать фотохимической активации бикомпонентных НЧ видимым светом [21] и увеличить их способность к фотохимической дезинфекции [22].

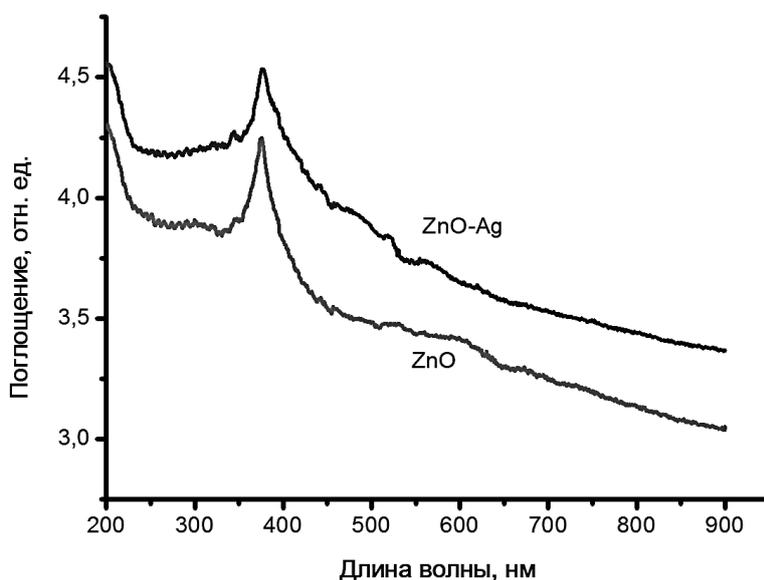


Рис. 4. Спектр поглощения НЧ ZnO и ZnO-Ag

Fig. 4. UV-Vis spectra of ZnO and ZnO-Ag NPs

Минимальную подавляющую концентрацию (МПК) НЧ определяли в аэробных условиях суспензионным методом в микропланшете. Для сравнения определяли МПК НЧ ZnO, полученных электрическим взрывом цинковой проволоки в кислородсодержащей атмосфере, и стандартных серебросодержащих препаратов: протеината серебра (Sigma-Aldrich, США) и раствора коллоидного серебра (Lextor protalor solution, Esko-Farm LLC, Армения). Полученные данные приведены на рис. 5.

Как следует из полученных данных, для НЧ ZnO-Ag (свет), находящихся под действием видимого света, значения МПК меньше (бактерии *E. coli*, *A. baumannii*, *A. faecalis*, *K. pneumonia*) либо соответствуют значению МПК для протеината серебра. В отношении бак-

терий *E. coli* МПК наночастиц ZnO-Ag ($62,5 \text{ мкг/мл}$), полученных электрическим взрывом, меньше, чем МПК НЧ ZnO-Ag ($100\text{--}150 \text{ мкг/мл}$), полученных при последовательном химическом осаждении из солей цинка и серебра в работах [23, 24].

Высокую активность НЧ ZnO-Ag, полученных при ЭВП, можно объяснить плотным контактом, возникающим в отдельной наночастице на границе раздела фаз ZnO и Ag, образующимся в условиях совместного ЭВП в атмосфере аргона и кислорода. Такие условия, в отличие от методов химического осаждения, исключают наличие примесей на границе раздела фаз. Электроны, накопленные на серебре, могут переноситься к молекулам кислорода, адсорбированным на поверхности частиц, с образо-

ванием радикалов $\bullet\text{NO}_2$, $\bullet\text{OH}$. Фотоиндуцированные дырки способны реагировать с поверхностно-связанными молекулами воды с образованием гидроксильных радикалов $\bullet\text{OH}$, являющихся сильными окислителями для органических химических ве-

ществ и микроорганизмов [25]. Возможный антибактериальный механизм НЧ ZnO-Ag основан на окислении бактериальной мембраны $\bullet\text{OH}$ радикалами, которые являются основными окислителями для инактивации бактерий.

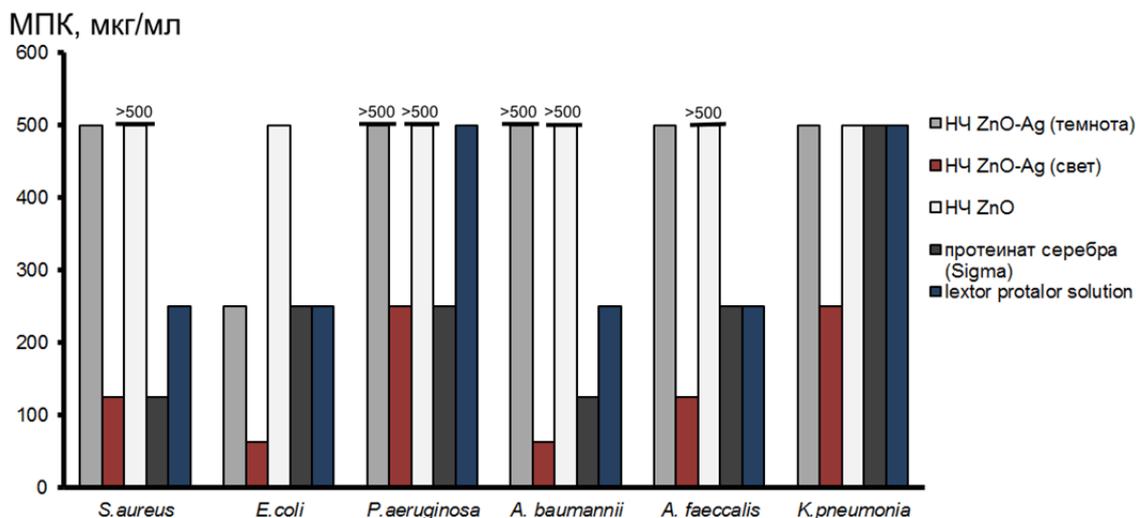


Рис. 5. Антибактериальная активность наночастиц

Fig. 5. Antibacterial activity of nanoparticles

Таким образом, повышенная антибактериальная активность НЧ ZnO-Ag может быть связана с двумя факторами. Ионы серебра способны высвобождаться с поверхности частицы, проникать через бактериальную мембрану, изменять её проницаемость и, возможно, также повреждать ДНК бактерий и клеточную мембрану. Вместе с этим серебро повышает активность выделения фотогенерируемых электронов, что приводит к образованию активных форм кислорода, которые вызывают гибель бактериальных клеток.

Выводы

1. Электрический взрыв 2 проволоки из цинка и серебра в кислородосодержащей атмосфере позволяет синтезировать наночастицы ZnO-Ag со структурой янус-наночастиц и средним размером 66 ± 4 нм.

2. Формирование янус-наночастиц ZnO-Ag предположительно происходит по следующему механизму. Первоначально наночастицы представляют со-

бой смесь цинка с серебром. При охлаждении частицы до температуры $1\ 975$ °С оксид цинка кристаллизуется, а жидкое серебро, температура плавления которого 962 °С, вытесняется из объема формирующейся наночастицы, что приводит к разделению компонентов.

3. Наночастицы ZnO-Ag проявляют более высокую или сравнимую антибактериальную активность по сравнению с наночастицами ZnO и препаратами на основе серебра под действием видимого света. Такой эффект позволяет снизить содержание серебра в антимикробных препаратах, что приведет к снижению их токсичности и стоимости.

4. Подавление жизнедеятельности бактерий НЧ ZnO-Ag осуществляется, вероятно, по двум механизмам: а) вследствие фотокаталитической генерации активных форм кислорода, б) за счет высвобождения ионов серебра. Такое антимикробное действие наночастиц будет препятствовать формированию резистентных штаммов микроорганизмов.

Список источников

1. Pillai P.P., Kowalczyk B., Kandere-Grzybowska K., Borkowska M., Grzybowski B.A. Engineering gram selectivity of mixed-charge gold nanoparticles by tuning the balance of surface charges // *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. V. 55(30). P. 8610–8614. DOI: 10.1002/anie.201602965
2. Huo S., Jiang Y., Gupta A., Jiang Z., Landis R.F., Hou S., Rotello V.M. Fully zwitterionic nanoparticle antimicrobial agents through tuning of core size and ligand structure // *ACS nano*. 2016. V. 10(9). P. 8732–8737. DOI: 10.1021/acsnano.6b04207
3. Li W.R., Xie X.B., Shi Q.S., Zeng H.Y., Ou-Yang Y.S., Chen Y.B. Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli* // *Applied microbiology and biotechnology*. 2010. V. 85(4). P. 1115–1122. DOI: 10.1007/s00253-009-2159-5
4. Upadhyay G.K., Rajput J.K., Pathak T.K., Kumar V., Purohit L.P. Synthesis of ZnO: TiO₂ nanocomposites for photocatalyst application in visible light // *Vacuum*. 2019. V. 160. P. 154–163. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.11.026

5. Sánchez-López E., Gomes D., Esteruelas G., Bonilla L., Lopez-Machado A.L., Galindo R., Souto E.B. Metal-based nanoparticles as antimicrobial agents: an overview // *Nanomaterials*. 2020. V. 10(2). P. 292. DOI: 10.3390/nano10020292
6. Lee K.M., Lai C.W., Ngai K.S., Juan J.C. Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: a review // *Water research*. 2016. V. 88. P. 428–448. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.045
7. Kumar S., Pandit V., Bhattacharyya K., Krishnan V. Sunlight driven photocatalytic reduction of 4-nitrophenol on Pt decorated ZnO-RGO nanoheterostructures // *Materials Chemistry and Physics*. 2018. V. 214. P. 364–376. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.113
8. Viorica G.P., Musat V., Pimentel A., Calmeiro T.R., Carlos E., Baroiu L., Fortunato E. Hybrid (Ag) ZnO/Cs/PMMA nanocomposite thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 803. P. 922–933. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.373
9. Sharma V., Harith G., Kumar S., Sharma R., Reddy K.L., Bahuguna A., Krishnan V. Amorphous titania matrix impregnated with Ag nanoparticles as a highly efficient visible-and sunlight-active photocatalyst material // *Materials technology*. 2017. V. 32(8). P. 461–471. DOI: 10.1080/10667857.2016.1271861
10. Saravanan R., Karthikeyan N., Gupta V.K., Thirumal E., Thangadurai P., Narayanan V., Stephen A.J.M.S. ZnO/Ag nanocomposite: an efficient catalyst for degradation studies of textile effluents under visible light // *Materials Science and Engineering: C*. 2013. V. 33 (4). P. 2235–2244. DOI: 10.1016/j.msec.2013.01.046
11. Rokesh K., Mohan S.C., Karuppachamy S., Jothivenkatachalam K. Photo-assisted advanced oxidation processes for Rhodamine B degradation using ZnO–Ag nanocomposite materials // *Journal of environmental chemical engineering*. 2018. V. 6(3). P. 3610–3620. DOI: 10.1016/j.jece.2017.01.023
12. Burlibaşa L., Chifriuc M.C., Lungu M.V., Lungulescu E.M., Mitrea S., Sbarcea G., Hermenean A. Synthesis, physico-chemical characterization, antimicrobial activity and toxicological features of AgZnO nanoparticles // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. V. 13(2). P. 4180–4197. DOI: 10.1016/j.arabjc.2019.06.015
13. Li Z., Zhang F., Meng A., Xie C., Xing J. ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method // *RSC Advances*. 2015. V. 5(1). P. 612–620. DOI: 10.1039/C5TC04152J
14. Thatikayala D., Banothu V., Kim J., Shin D.S., Vijayalakshmi S., Park J. Enhanced photocatalytic and antibacterial activity of ZnO/Ag nanostructure synthesized by Tamarindus indica pulp extract // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. V. 31(7). P. 5324–5335. DOI: 10.1007/s10854-020-03093-4
15. Zare M., Namratha K., Alghamdi S., Mohammad Y.H.E., Hezam A., Zare M., Zhang X. Novel green biomimetic approach for synthesis of ZnO-Ag nanocomposite; antimicrobial activity against food-borne pathogen, biocompatibility and solar photocatalysis // *Scientific reports*. 2019. V. 9(1). P. 1–15. DOI: 10.1038/s41598-019-44309-w
16. El-Nahhal I.M., Salem J., Anbar R., Kodeh F.S., Elmanama A. Preparation and antimicrobial activity of ZnO-NPs coated cotton/starch and their functionalized ZnO-Ag/cotton and Zn (II) curcumin/cotton materials // *Scientific reports*. 2020. V. 10(1). P. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-020-61306-6
17. Seong S., Park I.S., Jung Y.C., Lee T., Kim S.Y., Park J.S., Ahn J. Synthesis of Ag-ZnO core-shell nanoparticles with enhanced photocatalytic activity through atomic layer deposition // *Materials & Design*. 2019. V. 177. P. 107831. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107831
18. Lerner M.I., Pervikov A.V., Glazkova E.A., Svarovskaya N.V., Lozhkomoev A.S., Psakhie S.G. Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements // *Powder Technology*. 2016. V. 288. P. 371–378. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.11.037
19. Bakina O.V., Glazkova E.A., Pervikov A.V., Rodkevich N.G., Vornakova E.A., Chzhou V.R., Lerner M.I. Electric explosion of wires as versatile method for antibacterial Janus-like ZnO–Ag nanoparticles preparation // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021. V. 32(8). P. 10623–10634. DOI: 10.1007/s10854-021-05718-8
20. Markova Z., Šišková K.M., Filip J., Čuda J., Kolář M., Šafářová K., Zbořil R. Air stable magnetic bimetallic Fe–Ag nanoparticles for advanced antimicrobial treatment and phosphorus removal // *Environmental science & technology*. 2013. V. 47(10). P. 5285–5293. DOI: 10.1021/es304693g
21. Alharth F.A., Alghamdi A.A., Al-Zaqri N., Alanazi H.S., Alsyahi A.A., Marghany A.E., Ahmad N. Facile one-pot green synthesis of Ag–ZnO Nanocomposites using potato peel and their Ag concentration dependent photocatalytic properties // *Scientific Reports*. 2020. V. 10(1). P. 1–14. DOI: 10.1038/s41598-020-77426-y
22. Primo J.D.O., Horsth D.F., Correa J.D.S., Das A., Bittencour, C., Umek P., Anaissi F.J. Synthesis and Characterization of Ag/ZnO Nanoparticles for Bacteria Disinfection in Water // *Nanomaterials*. 2022. V. 12(10). P. 1764. DOI: 10.3390/nano12101764
23. Panwar A., Yadav K.L., Yadav K.L. Silver doped zinc oxide nanostructures with antibacterial properties against GFP-expressing antibiotic resistant Escherichia coli // *Materials Letters*. 2022. V. 309. P. 131469. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131469
24. Li Z., Zhang F., Meng A., Xie C., Xing J. ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method // *RSC Advances*. 2015. V. 5(1). P. 612–620. DOI: 10.1039/C4RA12319K
25. Essawy A.A., Alsohaimi I.H., Alhumaimess M.S., Hassan H.M., Kamel M.M. Green synthesis of spongy Nano-ZnO productive of hydroxyl radicals for unconventional solar-driven photocatalytic remediation of antibiotic enriched wastewater // *Journal of Environmental Management*. 2020. V. 271. P. 110961. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110961

References

1. Pillai, P.P., Kowalczyk, B., Kandere-Grzybowska, K., Borkowska, M. & Grzybowski, B.A. (2016) Engineering gram selectivity of mixed-charge gold nanoparticles by tuning the balance of surface charges. *Angewandte Chemie International Edition*. 55(30), pp. 8610–8614. DOI: 10.1002/anie.201602965
2. Huo, S., Jiang, Y., Gupta, A., Jiang, Z., Landis, R.F., Hou, S. & Rotello V.M. (2016) Fully zwitterionic nanoparticle antimicrobial agents through tuning of core size and ligand structure. *ACS nano*. 10(9), pp. 8732–8737. DOI: 10.1021/acsnano.6b04207
3. Li, W.R., Xie, X.B., Shi, Q.S., Zeng, H.Y., Ou-Yang, Y.S. & Chen, Y.B. (2010) Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on Escherichia coli. *Applied microbiology and biotechnology*. 85(4), pp. 1115–1122. DOI: 10.1007/s00253-009-2159-5
4. Upadhyay, G.K., Rajput, J.K., Pathak, T.K., Kumar, V. & Purohit, L.P. (2019) Synthesis of ZnO: TiO₂ nanocomposites for photocatalyst application in visible light. *Vacuum*. 160, pp. 154–163. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.11.026

5. Sanchez-Lopez, E., Gomes, D., Esteruelas, G., Bonilla, L., Lopez-Machado, A.L., Galindo, R. & Souto, E.B. (2020) Metal-based nanoparticles as antimicrobial agents: an overview. *Nanomaterials*. 10(2). pp. 292. DOI: 10.3390/nano10020292
6. Lee, K.M., Lai, C.W., Ngai, K.S., Juan, J.C. (2016) Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: a review. *Water Research*. 88. pp. 428–448. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.045
7. Kumar, S., Pandit, V., Bhattacharyya, K. & Krishnan, V. (2018) Sunlight driven photocatalytic reduction of 4-nitrophenol on Pt decorated ZnO-RGO nanoheterostructures. *Materials Chemistry and Physics*. 214. pp. 364–376. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.113
8. Viorica, G.P., Musat, V., Pimentel, A., Calmeiro, T.R., Carlos, E., Baroiu, L. & Fortunato, E. (2019) Hybrid (Ag) ZnO/Cs/PMMA nanocomposite thin films. *Journal of Alloys and Compounds*. 803. pp. 922–933. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.373
9. Sharma, V., Harith, G., Kumar, S., Sharma, R., Reddy, K.L., Bahuguna, A., Krishnan, V. (2017) Amorphous titania matrix impregnated with Ag nanoparticles as a highly efficient visible-and sunlight-active photocatalyst material. *Materials Technology*. 32(8). pp. 461–471. DOI: 10.1080/10667857.2016.1271861
10. Saravanan, R., Karthikeyan, N., Gupta, V.K., Thirumal, E., Thangadurai, P., Narayanan, V., Stephen, A.J.M.S. (2013) ZnO/Ag nanocomposite: an efficient catalyst for degradation studies of textile effluents under visible light. *Materials Science and Engineering: C*. 33(4). pp. 2235–2244. DOI: 10.1016/j.msec.2013.01.046
11. Rokesh, K., Mohan, S.C., Karuppachamy, S. & Jothivenkatachalam, K. (2018) Photo-assisted advanced oxidation processes for Rhodamine B degradation using ZnO–Ag nanocomposite materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6(3). pp. 3610–3620. DOI: 10.1016/j.jece.2017.01.023
12. Burlibaşa, L., Chifiriuc, M.C., Lungu, M.V., Lungulescu, E.M., Mitrea, S., Sbarcea, G. & Hermenean, A. (2020) Synthesis, physico-chemical characterization, antimicrobial activity and toxicological features of AgZnO nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*. 13(2). pp. 4180–4197. DOI: 10.1016/j.arabjc.2019.06.015
13. Li, Z., Zhang, F., Meng, A., Xie, C. & Xing, J. (2015) ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method. *RSC Advances*. 5(1). pp. 612–620. DOI: 10.1039/C5TC04152J
14. Thatikayala, D., Banothu, V., Kim, J., Shin, D.S., Vijayalakshmi, S. & Park, J. (2020) Enhanced photocatalytic and antibacterial activity of ZnO/Ag nanostructure synthesized by Tamarindus indica pulp extract. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 31(7). pp. 5324–5335. DOI: 10.1007/s10854-020-03093-4
15. Zare, M., Namratha, K., Alghamdi, S., Mohammad, Y. H. E., Hezam, A., Zare, M. & Zhang, X. (2019). Novel green biomimetic approach for synthesis of ZnO–Ag nanocomposite; antimicrobial activity against food-borne pathogen, biocompatibility and solar photocatalysis. *Scientific Reports*. 9(1). pp. 1–15. DOI: 10.1038/s41598-019-44309-w
16. El-Nahhal, I.M., Salem, J., Anbar, R., Kodeh, F.S. & Elmanama, A. (2020) Preparation and antimicrobial activity of ZnO-NPs coated cotton/starch and their functionalized ZnO-Ag/cotton and Zn (II) curcumin/cotton materials. *Scientific Reports*. 10(1). pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-020-61306-6
17. Seong, S., Park, I.S., Jung, Y.C., Lee, T., Kim, S.Y., Park, J.S. & Ahn, J. (2019) Synthesis of Ag-ZnO core-shell nanoparticles with enhanced photocatalytic activity through atomic layer deposition. *Materials & Design*. 177. pp. 107831. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107831
18. Lerner, M.I., Pervikov, A.V., Glazkova, E.A., Svarovskaya, N.V., Lozhkomoiev, A. S. & Psakhie, S.G. (2016) Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements. *Powder Technology*. 288. pp. 371–378. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.11.037
19. Bakina, O.V., Glazkova, E.A., Pervikov, A.V., Rodkevich, N.G., Vornakova, E.A., Chzhou, V.R. & Lerner, M.I. (2021) Electric explosion of wires as versatile method for antibacterial Janus-like ZnO–Ag nanoparticles preparation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 32(8). pp. 10623–10634. DOI: 10.1007/s10854-021-05718-8
20. Markova, Z., Šišková, K.M., Filip, J., Čuda, J., Kolář, M., Šafářová, K. & Zbořil, R. (2013) Air stable magnetic bimetallic Fe–Ag nanoparticles for advanced antimicrobial treatment and phosphorus removal. *Environmental Science & Technology*. 47(10). pp. 5285–5293. DOI: 10.1021/es304693g
21. Alharth, F.A., Alghamdi, A.A., Al-Zaqri, N., Alanazi, H.S., Aalsyahi, A.A., Marghany, A.E. & Ahmad, N. (2020) Facile one-pot green synthesis of Ag–ZnO Nanocomposites using potato peel and their Ag concentration dependent photocatalytic properties. *Scientific Reports*. 10(1). pp. 1–14. DOI: 10.1038/s41598-020-77426-y
22. Primo, J.D.O., Horsth, D.F., Correa, J.D.S., Das, A., Bittencour, C., Umek, P. & Anaissi, F.J. (2022) Synthesis and Characterization of Ag/ZnO Nanoparticles for Bacteria Disinfection in Water. *Nanomaterials*. 12(10). pp. 1764. DOI: 10.3390/nano12101764
23. Panwar, A., Yadav, K.L. & Yadav, K.L. (2022) Silver doped zinc oxide nanostructures with antibacterial properties against GFP-expressing antibiotic resistant Escherichia Coli. *Materials Letters*. 309. p. 131469. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131469
24. Li, Z., Zhang, F., Meng, A., Xie, C. & Xing, J. (2015) ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method. *RSC Advances*. 5(1). pp. 612–620. DOI: 10.1039/C4RA12319K
25. Essawy, A.A., Alsohaimi, I.H., Alhumaimess, M.S., Hassan, H.M. & Kamel, M.M. (2020) Green synthesis of spongy Nano-ZnO productive of hydroxyl radicals for unconventional solar-driven photocatalytic remediation of antibiotic enriched wastewater. *Journal of Environmental Management*. 271. pp. 110961. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110961

Информация об авторах:

Бакина Ольга Владимировна – доктор технических наук, старший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия). E-mail: ovbakina@ispms.tsc.ru

Глазкова Елена Алексеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия). E-mail: eagl@ispms.tsc.ru

Сваровская Наталья Валентиновна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия). E-mail: nvsv@ispms.tsc.ru

Волков Александр Максимович – студент Сибирского государственного медицинского университета (Томск, Россия). E-mail: sancho_poncho@mail.ru

Ворожцов Александр Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: abv1953@mail.ru

Лернер Марат Израильевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией физикохимии высокодисперсных материалов Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия), главный научный сотрудник лаб. нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lerner@ispms.tsc.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bakina Olga V., Dr.Sc. (Engineering), senior researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ovbakina@ispms.tsc.ru

Glazkova Elena A., Cans.Sc. (Engineering), senior researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: eagl@ispms.tsc.ru

Svarovskaya Natalia V., Cand.Sc. (Chemistry), senior researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nvsv@ispms.tsc.ru

Volkov Alexandr M., student of the Siberian State Medical University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sancho_poncho@mail.ru

Vorozhtsov Alexandr B., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: abv1953@mail.ru

Lerner Marat I., Dr.Sc. (Engineering), head of laboratory, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: lerner@ispms.tsc.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023