

УДК 666.653.2+621.318.1+539.216.1+549.731.1+620.187+541.141

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НАНОРАЗМЕРНОГО ПОРОШКА И ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВОГО ФЕРРИТА

© 2024 г. С. Н. Иванин^{a, b, *}, В. Ю. Бузько^{a, c}, Р. П. Якупов^a, И. В. Сухно^b

^aКубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149,
Краснодар, 350040 Россия

^bКубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина, ул. Калинина, 13,
Краснодар, 350044 Россия

^cКубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2,
Краснодар, 350072 Россия

*e-mail: ivanin18071993@mail.ru

Поступила в редакцию 08.11.2023 г.

После доработки 13.12.2023 г.

Принята к публикации 15.12.2023 г.

Синтезированы наноразмерный порошок и наноструктурированные волокна никель-цинкового феррита состава $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Методом РФА доказано, что полученные образцы соответствуют фазе никель-цинкового феррита. Установлено, что волокна на основе никель-цинкового феррита обладают большим параметром кристаллической решетки и размером кристаллитов, чем синтезированный наноразмерный порошок. Методом РЭМ показано, что исследуемые образцы состоят из наноразмерных частиц: 20–60 нм для порошка и 20–40 нм для волокон. Оптическим методом диффузного отражения определена ширина запрещенной зоны для образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, которая составила 1.58 эВ для волокон и 1.67 эВ для порошка. Исследована фотокаталитическая деградация метиленового синего под действием образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ различной морфологии. Установлено, что большей фотокаталитической активностью обладает образец наноструктурированных волокон $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, так как степень деградации метиленового синего составляет 26% для нановолокон и 18% для нанопорошка.

Ключевые слова: фотокатализ, никель-цинковый феррит, нанопорошок, волокна, электроформование

DOI: 10.31857/S0044457X24050093, **EDN:** YEXKLX

ВВЕДЕНИЕ

Наноразмерные ферриты 3d-металлов являются важными технологическими материалами. Они находят применение в широком спектре отраслей, включая экологическую [1, 2] и техносферную безопасность [3–6]. Это связано с их высокой фотокаталитической активностью [7–11], благодаря чему их можно поставить в основу недорогой и экологически чистой технологии очистки сточных или иных загрязненных вод [12–15].

Как известно [9, 14], фотокаталитическое окисление органических соединений в водных средах основано на реакционных свойствах фотогенерированных электронно-дырочных пар, поэтому на эффективность фотокатализа в наибольшей степени влияют электронная структура и морфология поверхности используемого фотокатализатора [16–18]. Наиболее изученным и распространенным фотока-

тализатором является наноразмерный диоксид титана (TiO_2) [19–21]. Его популярность как фотокатализатора связана с его нетоксичностью, дешевизной, фото- и химической устойчивостью, а также высокой фотокаталитической активностью. Однако значительная ширина запрещенной зоны для наночастиц диоксида титана (>3 эВ) обуславливает ограничение эффективного поглощения солнечного света в видимой области спектра (~5% [22]), что накладывает ограничения на его практическое применение.

В связи с этим актуальной задачей является поиск неорганических фотокатализаторов с более узкой шириной запрещенной зоны, которые позволят эффективно использовать в качестве источника возбуждения видимый рассеянный свет солнца и искусственных ламп. При этом желательно, чтобы полупроводниковый фотокатализатор, помимо высокой ультрадисперсности, обладал выраженными

магнитными свойствами, что позволит его эффективно рециклировать [9, 23, 24]. Одним из таких материалов является никель-цинковый феррит эквивалентного состава $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ [25], ширина запрещенной зоны которого значительно меньше (от 2.5 до 1.47 эВ) [26], чем у диоксида титана, и хорошо соответствует энергетическому потенциалу рассеянного солнечного света и света от искусственных ламп.

Фотокаталитические свойства различных образцов микро- и нанопорошков никель-цинкового феррита хорошо известны [24, 27–31]. В связи со сравнительно низкой реакционной способностью ферритов в фотокатализе предпринимаются попытки их модификации, в основном химической, которые заключаются в замене переходного металла в никель-цинковом феррите [31]. В данной работе мы предлагаем метод модификации никель-цинкового феррита для его применения в качестве фотокатализатора, направленный на изменение его микроструктуры, а именно на получение наноструктурированных волокон никель-цинкового феррита. Ранее наноразмерные порошки [32] и микроволокна на основе $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ показали высокую эффективность при удалении различных органических красителей из водных растворов [33].

В связи с этим целью настоящей работы являлся синтез наноразмерного порошка и волокон на основе никель-цинкового феррита, исследование их микроструктуры, оптических свойств и фотокаталитической активности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы. В работе использовали $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х. ч.), глицин (ч. д. а.), поливиниловый спирт (ч., CAS № 9002-89-5), метиленовый синий (ч. д. а., ТУ 2463-044-05015207-97). Метиленовый синий применяли в качестве целевого органического соединения для исследования эффективности фотокаталитического разложения.

Синтез порошка никель-цинкового феррита. Наноразмерный порошок феррита $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ получали пирохимическим глицин-нитратным (G-N) золь-гель методом, который позволяет получать высокопористые ультрадисперсные нанопорошки феррита [34, 35], в отличие от других методов синтеза [25, 26, 36–39]. В процессе синтеза исходные $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и глицин при отношении G/N = 0.5 растворяли в бидистиллированной воде и нагревали до выпаривания воды и получения (через стадию образова-

ния золя) высоковязкого металлокомплексного геля, который при дальнейшем нагревании постепенно выгорал с образованием наноразмерного порошка феррита. Глицин использовали в качестве органического комплексообразователя и топливного компонента для протекания синтеза феррита. Далее полученный порошок никель-цинкового феррита отжигали в муфельной печи при температуре 600°C в течение 1 ч, скорость нагрева составляла 40 град/мин.

Синтез волокон никель-цинкового феррита. Синтез волокон никель-цинкового феррита проводили методом электроформования на установке собственной разработки (рис. 1) [40], позволяющей формировать волокна из раствора, стекающего под действием гравитационной силы по вертикально ориентированному формовочному электроду — металлическому проводу, в котором проволока сечением 0.2 мм намотана на проволоку сечением 1 мм. Образующиеся волокна собирали на заземленный вращающийся цилиндрический коллектор, находящийся на расстоянии 10 см от формовочного электрода. Разницу потенциалов (18 кВ) между формовочным электродом и коллектором создавали за счет их подключения к источнику высокого напряжения.

Раствор для получения волокнистого материала никель-цинкового феррита методом электроформования получали растворением порошка поливинилового спирта в бидистиллированной воде в соотношении 1 : 9 по массе и добавлением необходимого стехиометрического количества кристаллогидратов нитратов металлов. С учетом химической формулы $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ стехиометрические количества исходных кристаллогидратов нитратов металлов добавляли в соответствующих отношении

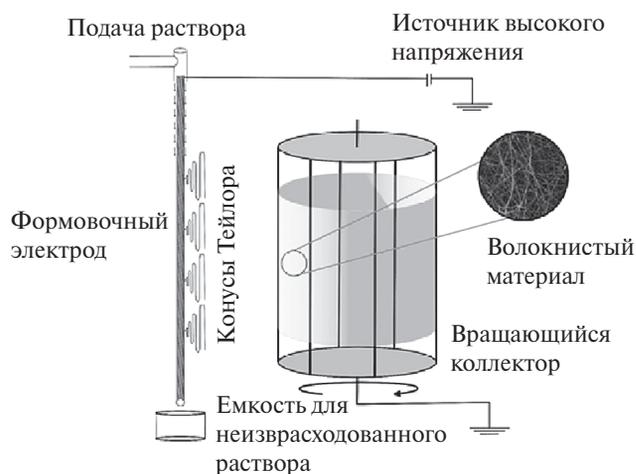


Рис. 1. Схема установки для электроформования безыгольного типа.

(1) количествах в раствор поливинилового спирта (10%) с перемешиванием до полного растворения при $W = 0.20$.

$$m_p/m_n = W, \quad (1)$$

где m_p — масса волокнообразующего компонента в формовочном растворе, г; m_n — масса солей прекурсоров в формовочном растворе, г; W — соотношение волокнообразующих компонентов и неорганических солей в формовочном растворе.

Перед электроформованием маточный раствор нагревали до температуры 85°C для уменьшения вязкости. Полученный в ходе процесса электроформования волокнистый материал сушили в вакуумном сушильном шкафу VD 23 и далее отжигали в муфельной печи при температуре 600°C в течение 1 ч, скорость нагрева составляла 40 град/мин.

Для определения структуры порошка и волокон $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ применяли метод порошкового рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000). Образец исследовали в диапазоне углов 2θ от 3° до 70° с интервалом сканирования 0.02°, использовали $CuK_{\alpha 1}$ -излучение ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Измерения проводили при комнатной температуре. Расчет размеров кристаллитов в образцах проводили с помощью метода Шеррера по уравнению (2):

$$D = K\lambda / \beta \sin\theta, \quad (2)$$

где D — средний размер кристаллитов, нм; K — безразмерный коэффициент формы частиц (постоянная Шеррера, равная 0.9 для частицы сферической формы); λ — длина волны рентгеновского излучения, Å; β — ширина рефлекса на полувысоте (в радианах и в единицах 2θ); θ — угол дифракции (брегговский угол, рад).

Исследования микроструктуры образцов проводили методом растровой электронной микроскопии на микроскопе сверхвысокого разрешения Jeol JSM 7500F. Регистрацию спектров диффузного отражения для определения оптической ширины запрещенной зоны изготовленных материалов осуществляли с помощью двухканальной интегрирующей сферы на спектрофотометре Hitachi U-3900.

Мутность водных дисперсий порошка и волокон $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ исследовали в бидистиллированной воде при концентрации 1 мг/л с помощью цифрового измерителя мутности Amtast АМТ27.

Исследование реакции фотокаталитической деградации метиленового синего (МС) в присутствии синтезированных образцов феррита проводили в одном растворе под воздействием электромагнитного излучения в диапазоне длин волн видимого света.

В качестве источника видимого излучения использовали светодиоды Sunlike (Корея). Раствор МС был приготовлен с концентрацией 10^{-6} г/л в бидистиллированной воде. Далее в 100 мл раствора добавляли по 100 мг образца феррита различной морфологии. Полученную суспензию выдерживали в темноте в течение 30 мин для приведения системы в равновесное состояние. Перемешивание системы осуществляли периодически (взмучиванием через 15 мин). Экспозицию светом светодиодов с интенсивностью светового потока 1200 Люкс осуществляли в течение 180 мин с отбором пробы объемом 1 мл каждые 30 мин. Концентрацию МС контролировали по спектрам оптического поглощения с помощью спектрофотометра Hitachi U-3900.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ

На рис. 2 представлены данные рентгенофазового анализа (РФА) для наноразмерного порошка и наноразмерных волокон никель-цинкового феррита. Дифрактограммы обоих исследованных образцов соответствуют фазе Ni-Zn феррита (JCPDS 52–0278).

В табл. 1 приведены результаты расчетов параметра кристаллической решетки a и размера кристаллитов (областей когерентного рассеяния) для исследованных образцов феррита различной морфологии.

Согласно РФА, величина постоянной кристаллической решетки исследованных образцов $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ хорошо согласуется с данными [24, 26]. Как следует из рис. 2, где представлены рентгеновские дифрактограммы образцов, рефлексы (400), (422), (511) и (440) на дифрактограмме волокон незначительно смещены в область более низких значений 2θ по сравнению с их положением на дифрактограмме нанопорошка, что связано с большим значением параметра кристаллической решетки. Следует также отметить, что ширина рефлекса на полувысоте для нанопорошка значительно больше, чем для волокон. Уширение рефлексов нанопорошка связано с меньшим размером кристаллитов.

Электронная микроскопия

На рис. 3 приведены данные растровой электронной микроскопии исследуемых образцов никель-цинкового феррита.

На рис. 3а, 3б приведены фотографии микроструктуры порошка, полученные при 2500- и 100 000-кратном увеличении соответственно. Стоит отметить, что образец представлен частицами

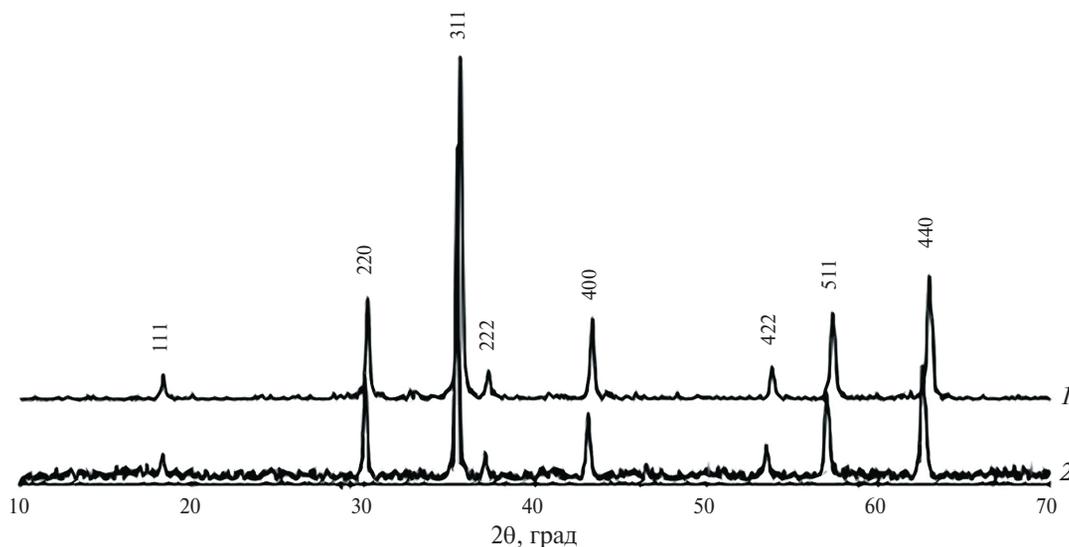


Рис. 2. Дифрактограммы исследуемого нанопорошка (1) и нановолокон (2) на основе никель-цинкового феррита.

размером 20–60 нм, объединенными в пористые структуры размером 20–50 мкм с размером пор от 10 нм до 5 мкм.

На рис. 3в, 3г приведены изображения волокон никель-цинкового феррита, полученные при увеличении 2500 и 75 000 раз соответственно. Волокна диаметром ~1 мкм обладают неоднородной поверхностью и формой. При более высоком увеличении (в 75 000 раз) видно, что волокна представлены наноразмерными частицами 20–40 нм с небольшим количеством пор размером 10–15 нм.

Оптические свойства

Спектры оптического диффузного отражения исследованных образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ различной морфологии изображены на рис. 4а.

Для определения оптической ширины запрещенной зоны оптические спектры диффузного отражения образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ были преобразованы в соответствии с уравнением Кубелка–Мунка (3):

$$F(R) = (1 - R)^2 / 2R, \quad (3)$$

где R — коэффициент отражения ($R = R(\%)/100$).

Оптическую ширину запрещенной зоны для исследованных образцов рассчитывали по соотношению Тауца [41].

На рис. 4б и 4в изображены графики соотношения Тауца для исследованных образцов нанопорошка и наноструктурированных волокон никель-цинкового феррита соответственно.

Анализируя данные рис. 4б, можно сделать вывод, что значение рассчитанной оптической ширины

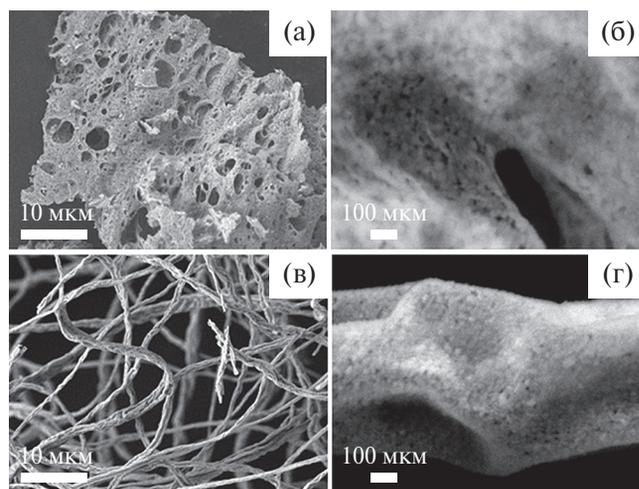


Рис. 3. Данные растровой электронной микроскопии исследуемых образцов порошка (а, б) и волокон (в, г) на основе никель-цинкового феррита, полученные при увеличении 2500–100 000 раз.

Таблица 1. Параметр a кристаллической решетки и размер кристаллитов для образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Образец	a , Å	Размер кристаллитов, нм
Порошок	8.36 ± 0.01	22.1 ± 2.5
Волокно	8.39 ± 0.01	38.5 ± 6.3

запрещенной зоны для образца нанопорошка $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ составило 1.67 эВ, а для образца наноструктурированных волокон — 1.58 эВ. Как известно [9, 14], меньшее значение оптической ширины запрещенной зоны полупроводникового материала говорит о том, что исследуемый материал

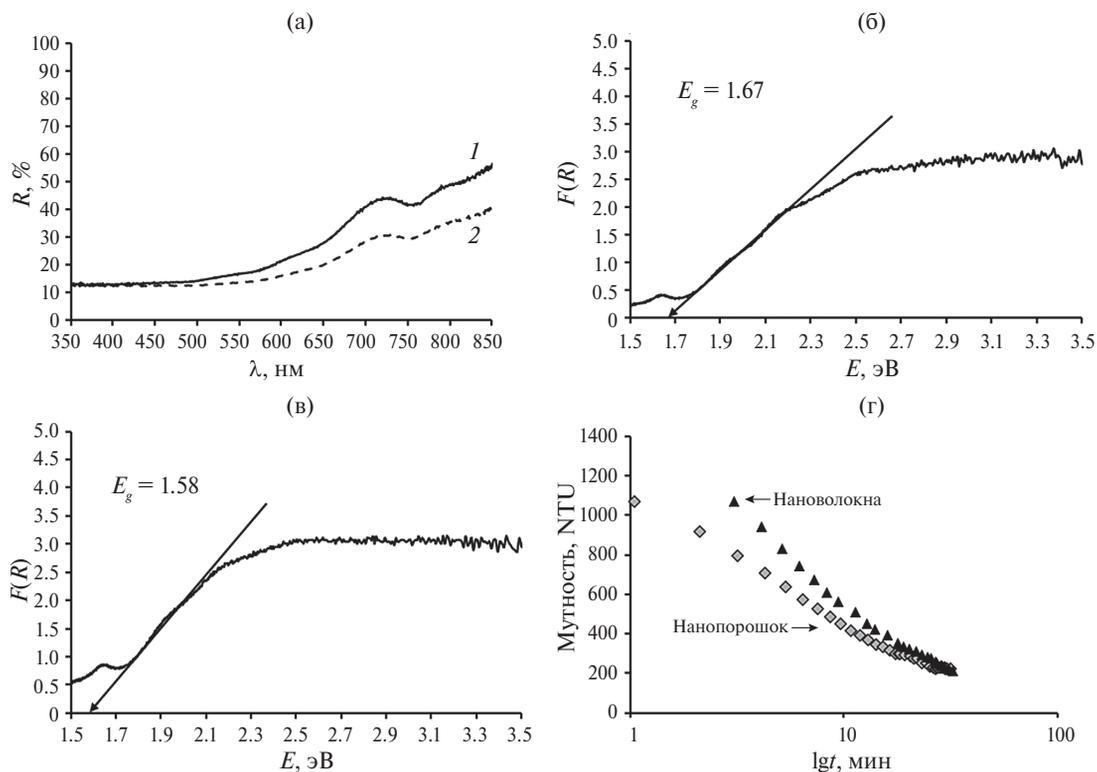


Рис. 4. Оптические характеристики исследованных образцов: а — спектры диффузного отражения исследуемых образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$; б — график соотношения Тауца для образца нанопорошка; в — график соотношения Тауца для образца наноструктурированных волокон; г — кинетическая кривая изменения мутности водных дисперсий образцов.

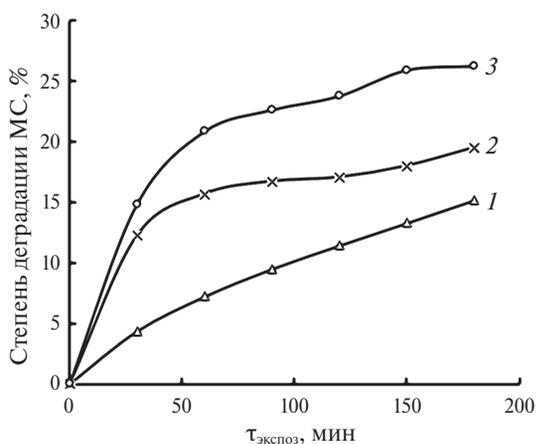


Рис. 5. Временная зависимость фотокаталитической деградации метиленового синего: 1 — образец без фотокатализатора, 2 — образец нанопорошка $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, 3 — образец наноструктурированных волокон $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

будет обладать большей фотокаталитической активностью при рассеянном солнечном свете и свете искусственных ламп/светодиодов.

Согласно данным временной зависимости изменения мутности водных дисперсий (рис. 4г) исследованных образцов никель-цинкового феррита сле-

дует, что водная дисперсия на основе наноструктурированных волокон обладает заметно большим светорассеянием, что может отрицательно сказываться на эффективности фотокатализа в объеме дисперсии при использовании этого материала.

Фотокаталитическая активность

На рис. 5 представлены графики временной зависимости фотокаталитической деградации метиленового синего при использовании в качестве фотокатализатора синтезированных образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ различной морфологии. Видно, что лучшей фотокаталитической активностью обладает образец наноструктурированных волокон, так как через 180 мин степень деградации МС достигает 26%, а для образца нанопорошка феррита — 18%, что приемлемо согласуется с данными работы [11]. Полученные результаты также подтверждают данные по ширине запрещенной зоны о предполагаемой фотокаталитической активности исследуемых образцов никель-цинкового феррита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глицин-нитратным методом синтезирован наноразмерный порошок никель-цинкового феррита.

Методом электроформования получены наноструктурированные волокна никель-цинкового феррита. Состав синтезированных нанопорошка и волокон $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ доказан методом порошкового рентгенофазового анализа. По данным растровой электронной микроскопии установлено, что порошок никель-цинкового феррита, полученный глицин-нитратным методом, обладает более высокой пористостью по сравнению с наноструктурированными волокнами феррита. По спектрам диффузного отражения определена ширина запрещенной зоны, значение которой для нанопорошка $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ составило 1.67 эВ по сравнению с величиной 1.58 эВ для наноструктурированных волокон. По исследованной временной зависимости фотокаталитической деградации метиленового синего установлено, что лучшей фотокаталитической активностью обладает образец $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в виде наноструктурированных волокон, что определяет его более высокую перспективность в практическом применении магнитных наноразмерных фотокатализаторов для водоочистки.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена на оборудовании лаборатории перспективных нанобиотехнологий ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» и НОЦ «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» ЦКП ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет».

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

У авторов отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Silva E.D.N., Brasileiro I.L.O., Madeira V.S. et al.* // J. Environ. Chem. Eng. 2020. V. 8. P. 104132. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104132>
2. *Dehghani F., Hashemian S., Shibani A.* // J. Ind. Eng. Chem. 2017. V. 48. P. 36. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.11.022>
3. *Šutka A., Gross A.* // Sens. Actuators B. 2016. V. 222. P. 95. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.08.027>
4. *Beyki M.H., Ganjbakhsh S.E., Minaeian S. et al.* // Carbohydr. Polym. 2017. V. 15. P. 128. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.06.056>
5. *Zhang W., Zhou P., Liu W. et al.* // J. Mol. Liq. 2020. V. 315. P. 113682. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113682>
6. *Kumar R., Jasrotia R., Himanshi P. et al.* // Inorg. Chem. Commun. 2023. V. 157. P. 111355. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111355>
7. *Li Y., Li Y., Xu X. et al.* // Chem. Geol. 2019. V. 504. P. 276. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.11.022>
8. *Jadhav S.A., Somvanshi S.B., Khedkar M.V. et al.* // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2020. V. 31. P. 11352. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03684-1>
9. *Jacinto M.J., Ferreira L.F., Silva V.C.* // J. Sol. Gel Sci. Technol. 2020. V. 96. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05333-9>
10. *Manohar A., Chintagumpala K., Kim K.H.* // Ceram. Int. 2021. V. 47. P. 7052. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.056>
11. *Rosales-Gonzalez O., Bolarín-Miro A.M., Cortes-Escobedo C.A. et al.* // Ceram. Int. 2022. V. 49. № 4. P. 6006. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.101>
12. *Reddy D.H.K., Yunang Y.-S.* // Coord. Chem. Rev. 2016. V. 315. P. 90. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.01.012>
13. *Hammad A.B.A., Hemdan B.A., Nahrawy A.M.E.* // J. Environ. Manage. 2020. V. 270. P. 110816. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110816>
14. *Kefeni K.K., Mamba B.B.* // Sustain. Mater. Technol. 2020. V. 23. P. e00140. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00140>
15. *Sharma S.S., Dutta V., Raizada P.* // J. Environ. Chem. Eng. 2021. V. 9. P. 105812. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105812>
16. *Susmita P., Amarjyoti C.* // Appl. Nanosci. 2014. V. 4. P. 839. <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0264-3>
17. *Estrada-Flores S., Martínez-Luévanos A., Perez-Berumen C.M.* // Bol. Soc. Espan. Ceram. Vid. 2020. V. 59. № 5. P. 209. <https://doi.org/10.1016/j.bsecev.2019.10.003>
18. *Martinson K.D., Belyak V.E., Sakhno D.D.* // Nanosystems: Phys., Chem., Math. 2021. V. 12. № 6. P. 792. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2021-12-6-792-798>
19. *Liu Y., Li Z., Green M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. № 19. P. 193003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa6500>
20. *Paromova A.A., Sinitsina A.A., Boitsova T.B. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2023. V. 93. № 2. P. 345. <https://doi.org/10.1134/S1070363223020159>
21. *Садовников А.А., Нечаев Е.Г., Бельтюков А.Н. и др.* // Журн. неорган. химии. 2021. Т. 66. № 4. С. 432. <https://doi.org/10.31857/S0044457X2104019X>
22. *Lavand A.B., Bhatu M.N., Malghe Y.S.* // J. Mater. Res. Technol. 2018. V. 8. № 1. P. 299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.05.019>

23. *Nabiyouni G., Ghanbari D., Ghasemi J.* // *J. Nano Struct.* 2015. V. 5. № 3. P. 289.
<https://doi.org/10.7508/jns.2015.03.011>
24. *Mohd Q., Khushnuma A., Braj R.S. et al.* // *Spectrochim. Acta Part A.* 2015. V. 137. P. 1348.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.09.039>.
25. *Shamray I.I., Buz'ko V.Yu., Goryachko A.I.* // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. V. 969. P. 012101.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012101>
26. *Buz'ko V.Yu., Shamrai I.I., Ryabova M.Yu. et al.* // *Inorg. Mater.* 2021. V. 57. № 1. P. 38.
<https://doi.org/10.1134/S0020168521010027>
27. *Yan L., Yue M., Shaofeng Z. et al.* // *Asian J. Chem.* 2013. V. 25. № 10. P. 5781.
<https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.OH89>
28. *Ma W., Wang N., Yang L.* // *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2019. V. 30. P. 20432.
<https://doi.org/10.1007/s10854-019-02382-x>
29. *Nag S., Ghosh A., Das D. et al.* // *Synth. Met.* 2020. V. 267. P. 116459.
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116459>
30. *Cehade W., Basma H.M., Abdallah A. et al.* // *Ceram. Int.* 2022. V. 48. № 1. P. 1238.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.209>
31. *Dhiman P., Rana G., Dawi E.A. et al.* // *Water.* 2023. V. 15. P. 187.
<https://doi.org/10.3390/w15010187>
32. *Liu R., Zhang Y., Li H. et al.* // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2015. V. 15. № 6. P. 4574.
<https://doi.org/10.1166/jnn.2015.9773>
33. *Yang X., Wang Z., Jing M. et al.* // *Water, Air, Soil Pollut.* 2014. V. 225. P. 1819.
<https://doi.org/10.1007/s11270-013-1819-3>
34. *Martinson K.D., Sakhno D.D., Belyak V.E. et al.* // *Nanosystems: Phys., Chem., Math.* 2020. V. 11. № 5. P. 595.
<https://doi.org/10.17586/2220-8054-2020-11-5-595-600>.
35. *Martinson K.D., Beliaeva A.D., Sakhno D.D. et al.* // *Water.* 2022. V. 14. P. 454.
<https://doi.org/10.3390/w14030454>
36. *Vyzulin S.A., Kalikintseva D.A., Miroshnichenko E.L. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci: Phys.* 2018. V. 82. № 11. P. 1451.
<https://doi.org/10.3103/S1062873818110242>
37. *Vyzulin S.A., Kalikintseva D.A., Miroshnichenko E.L. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci: Phys.* 2018. V. 82. № 8. P. 943.
<https://doi.org/10.3103/S1062873818080439>
38. *Kalikintseva D.A., Buz'ko V.Y., Vyzulin S.A. et al.* // *Izvest. Ross. Akad. Nauk. Ser. Fizich.* 2021. V. 85. № 1. P. 112.
<https://doi.org/10.31857/S0367676521010142>
39. *Surendran P., Lakshmanan A., Sakthy Priya S. et al.* // *Appl. Phys. A.* 2020. V. 126. P. 257.
<https://doi.org/10.1007/s00339-020-3435-6>
40. *Якупов Р.П., Бузько В.Ю., Иванов С.Н., Панюшкин В.Т.* Пат. RU 2802465 С1. 29.08.2023.
41. *Makula P., Pacia M., Masyk W.* // *J. Phys. Chem. Lett.* 2018. V. 9. P. 6814.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcl.8b02892>

RESEARCH OF THE PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF NANO-SIZED POWDER AND FIBER BASED ON NICKEL-ZINC FERRITE

S. N. Ivanin^{a,b,*}, V. Yu. Buz'ko^{a,c}, R. P. Yakupov^a, I. V. Suhno^b

^a*Kuban State University, Krasnodar, 350040 Russia*

^b*Kuban State Agrarian University named after. I.T. Trubilina, Krasnodar, 350044 Russia*

^c*Kuban State Technological University, Krasnodar, 350072 Russia*

*e-mail: ivanin18071993@mail.ru

Nano-sized powder and nanostructured fibers of nickel-zinc ferrite with the composition $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ were synthesized. By means of X-ray diffraction analysis, it was proven that the synthesized samples correspond to the nickel-zinc ferrite phase. Based on the data obtained, it was established that fibers based on nickel-zinc ferrite have a higher value of the crystal lattice parameter and crystallite size than the synthesized nano-sized powder. SEM data confirm that the samples under study consist of nanosized particles: 20–60 nm for powder and 20–40 nm for fibers. The optical diffuse reflection method was used to determine the band gap for $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ samples, which was 1.58 eV for fibers and 1.67 eV for powder. The photocatalytic degradation of methylene blue under the action of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ samples of various morphologies has been studied. It was determined that a sample of nanostructured $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ fibers has greater photocatalytic activity, since the degree of degradation of methylene blue was 26% for nanofibers and 18% for nanopowder.

Keywords: photocatalysis, nickel-zinc ferrite, nanopowder, fibers, electrospinning, photocatalytic activity