



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Изготовление, описание и оценка эффективности материала на основе нанографита, легированного оксидом цинка, в качестве датчика влажности

Фаррух Вахеед<sup>1, а</sup>, Амтул Каюм<sup>2, б</sup>, Мухаммад Файзан Ширази<sup>3, с, \*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра информатики, Университет UIT, улица Абуль Хасан Исфакани, Блок 7, Гульшан-и-Икбал, Карачи, 75300, Пакистан

<sup>2</sup> Кафедра химии, Инженерно-технологический университет имени Н.Э. Диншоу, Университетская дорога, Карачи, 75270, Пакистан

<sup>3</sup> Кафедра электротехники, Инженерно-технологический университет имени Н.Э. Диншоу, Университетская дорога, Карачи, 75270, Пакистан

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0009-0004-6527-0965>,  [fwbaig@uitu.edu.pk](mailto:fwbaig@uitu.edu.pk); <sup>б</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0149-2177>,  [amtulq@neduet.edu.pk](mailto:amtulq@neduet.edu.pk);

<sup>с</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4488-8860>,  [faizanshirazi@neduet.edu.pk](mailto:faizanshirazi@neduet.edu.pk)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.382.32:538.975

#### История статьи:

Поступила: 04 июня 2025

Рецензирование: 23 июня 2025

Принята к печати: 10 июля 2025

Доступно онлайн: 15 сентября 2025

#### Ключевые слова:

Датчик влажности

Наночастицы ZnO

Устройства интеллектуального сенсорного восприятия

Анализ ёмкости и комплексного сопротивления (импеданса)

Быстрый отклик и восстановление  
Экологический и промышленный мониторинг

#### Финансирование

Данная работа выполнена в рамках PhD-программы NEDUET.

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Современный рост требований к технологиям мониторинга окружающей среды в режиме реального времени обуславливает необходимость создания высокоэффективных датчиков влажности с коротким временем отклика, высокой чувствительностью и длительной стабильностью работы. Оксид цинка (ZnO) является одним из наиболее перспективных полупроводниковых оксидов благодаря своей химической стабильности, доступности и чувствительности к изменению влажности. Однако для повышения рабочих характеристик ZnO требуется целенаправленная модификация его структурных и электронных свойств. В данном исследовании рассматривается легирование наночастиц ZnO наногрифитовым материалом (NGM) с целью улучшения чувствительности и кинетики адсорбционно-десорбционных процессов. **Предмет и цель работы.** Основной целью работы является разработка ёмкостных датчиков влажности на основе нанокompозита ZnO-NGM с улучшенными параметрами времени отклика и восстановления, а также с повышенной чувствительностью. Для этого предполагается модифицировать электронные и поверхностные свойства ZnO путём его легирования наногрифитовым материалом, что должно способствовать улучшению сенсорных характеристик. **Методы исследования.** Нанокompозиты ZnO-NGM с различным массовым содержанием NGM (1, 2, 4, 5 и 10 %) были синтезированы методом химического осаждения. Оптические свойства образцов чистого ZnO изучались с помощью оптической спектроскопии (UV-visible spectroscopy), которая выявила резкий край поглощения при 367 нм, соответствующий ширине запрещённой зоны около 3,3 эВ. Структурные и морфологические характеристики композитов анализировались методами рентгеновской дифракции (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM), подтвердившими успешную интеграцию NGM в матрицу ZnO и увеличение пористости поверхности. Для изготовления сенсорных элементов на стеклянные подложки с покрытием из фтор-легированного оксида олова (FTO) ножевым устройством наносились композитные плёнки. Сенсорные характеристики измерялись в камере с контролируемой атмосферой азота при относительной влажности (RH) от 10 до 95 % в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц. **Результаты и обсуждение.** Датчик на основе ZnO, легированного 4 % NGM, продемонстрировал оптимальные параметры: время отклика составило 4,0 с, время восстановления – 6,2 с, а чувствительность превосходила показатели остальных исследованных составов. Улучшение функциональных характеристик связано с увеличением удельной поверхностной электропроводности и ускорением кинетики адсорбционно-десорбционных процессов, обусловленных присутствием наногрифита, который способствует формированию более пористой и активной поверхности. Разработанные ёмкостные датчики влажности обладают высоким потенциалом для интеграции в современные системы мониторинга окружающей среды в реальном времени, а также в промышленные процессы автоматизации и интеллектуальные системы управления влажностью в бытовых условиях. Введение наногрифита в структуру ZnO существенно улучшает сенсорные характеристики датчиков влажности. Нанокompозит ZnO-NGM с содержанием 4 % наногрифита проявляет наилучшие эксплуатационные свойства и является перспективным материалом для создания высокоэффективных датчиков влажности нового поколения.

**Для цитирования:** Вахеед Ф., Каюм А., Ширази М.Ф. Изготовление, описание и оценка эффективности материала на основе наногрифита, легированного оксидом цинка, в качестве датчика влажности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 183–204. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-183-204.

### Введение

Датчики влажности широко применяются в таких областях, как сельское хозяйство, пищевая промышленность, медицинская диагностика

#### \*Адрес для переписки

Ширази Мухаммад Файзан, к.т.н.

Кафедра электротехники,

Инженерно-технологический университет имени Н.Э. Диншоу,

Университетская дорога,

75270, Карачи, Пакистан

Тел.: +92-21-99261261-8 (доб. 2215), e-mail: faizanshirazi@neduet.edu.pk

и экологический мониторинг. Это обусловлено возрастающей необходимостью получения точных данных в реальном времени для современных интеллектуальных систем управления. Основными требованиями к современным датчикам влажности являются низкое энергопотребление, быстрый отклик, высокая стабильность и экономическая доступность [1, 2].

В ряде исследований представлены различные инновационные подходы к созданию датчи-

ков влажности. Так, разработан гибкий датчик, способный фиксировать малейшие изменения дыхания, что имеет большое значение для медицины [3, 4]. Аналогично высокочувствительные датчики на основе композиционных материалов с углеродными нанотрубками демонстрируют короткое время отклика, это обеспечивает их пригодность для разнообразных условий эксплуатации [5]. Другие работы подтверждают эффективность использования инкапсулированных ионных жидкостей в наноструктурированных матрицах, что способствует улучшению сенсорных характеристик [6]. В настоящее время особое внимание уделяется разработке самопитаемых и биосовместимых датчиков, при этом датчики на основе оксида графена обещают энергоэффективное и высокочувствительное обнаружение [7]. Например, датчик влажности со встроенным датчиком измерения температуры, созданный на основе восстановленного оксида графена (rGO) и дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), демонстрирует широкие возможности для практического применения в реальных условиях [8]. Исследования гетероструктур  $\text{TiO}_2\text{-SnS}_2$  также подчеркивают преимущества использования наноструктурных материалов для повышения эффективности сенсорных устройств [9–12].

Датчики влажности на основе оксидов металлов, таких как  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SnO}_2$ , широко исследуются благодаря их высокой стабильности и чувствительности к изменениям влажности. Принцип их работы основан на изменении электрической ёмкости или сопротивления вследствие адсорбции молекул воды на поверхности сенсорного материала [1–3]. Среди этих материалов  $\text{ZnO}$  выделяется своей универсальностью и эффективностью для создания высокочувствительных датчиков влажности. Кроме того, регулируемые электронные свойства  $\text{ZnO}$ , достигаемые путём легирования различными элементами и контролируемого наноструктурирования, позволяют гибко адаптировать сенсорные характеристики под конкретные требования [13, 14]. Особый интерес представляет нанографитовый материал (NGM), синтезируемый экологически безопасным методом из кожуры апельсина и лимона, который способствует улучшению параметров  $\text{ZnO}$ -датчиков за счёт повышения эффективности передачи заряда, увеличения адсорбционной способности и стабильности, что

соответствует принципам устойчивого развития в нанотехнологиях [10].

Современные исследования всё более акцентируют внимание на необходимости повышения скорости отклика и устойчивости к многократным циклам восстановления датчиков влажности, поскольку эти параметры являются критически важными для их эффективного функционирования в условиях реального времени [15, 16]. Как продемонстрировано в работе Уллаха и соавторов (Ullah et al.), интеграция нанографита с оксидами металлов существенно сокращает время отклика и восстановления сенсорных устройств, устраняя ограничения, характерные для традиционных материалов [17]. Аналогично исследование Чаудхари и коллег (Chaudhary et al.) выделяет значимость применения инновационных структур и новых материалов для улучшения общих рабочих характеристик датчиков влажности [18]. Кроме того, результаты, полученные Ли и соавторами (Li et al.), показывают высокую эффективность легирования  $\text{ZnO}$  нанографитом для повышения чувствительности сенсоров при различных уровнях влажности, что подтверждает перспективность данного подхода для практического применения [13]. Управление электронными свойствами за счёт введения нанографита открывает новые возможности для повышения надёжности и эффективности сенсорных систем, делая их более пригодными для интеграции в платформы систем контроля промышленного оборудования через Интернет (IoT – Internet of Things) и интеллектуальные технологические решения [14].

Несмотря на достигнутый прогресс, сохраняется острая необходимость в разработке датчиков влажности на основе  $\text{ZnO}$  с ещё более коротким временем отклика, улучшенной стабильностью и использованием экологически безопасных, масштабируемых и экономичных методов синтеза. В частности, интеграция нанографитового материала в матрицу  $\text{ZnO}$  посредством доступных и простых химических технологий остается недостаточно изученной областью, что определяет перспективы дальнейших исследований.

**Целью настоящей работы** является преодоление существующих ограничений посредством синтеза нанокompозитов  $\text{ZnO}$ -NGM методом химического осаждения, отличающимся низкой себестоимостью и технологической простотой.

Полученные нанокompозиты наносились на подложки из фтор-легированного оксида олова (FTO) с помощью ножевого устройства для изготовления ёмкостных датчиков влажности. Предполагается, что введение nanoграфитового материала (NGM) способствует улучшению характеристик сенсора за счет повышения электрической проводимости и усиления взаимодействия с молекулами воды на поверхности материала.

Для комплексного анализа структурных, оптических и химических свойств синтезированных нанокompозитов применялись методы оптической спектроскопии (UV-visible spectroscopy), сканирующей электронной микроскопии (SEM), рентгеновской дифракции (XRD) и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Сенсорные характеристики датчиков оценивались посредством измерения ёмкости и комплексного сопротивления (импеданса) в атмосфере с контролируемым содержанием азота при относительной влажности (RH) в диапазоне от 10 до 95 % [19]. Анализ зависимости ёмкости и комплексного сопротивления (импеданса) от влажности позволил определить чувствительность и динамические параметры сенсорных устройств.

Полученные результаты способствуют развитию усовершенствованных нанодатчиков влажности с перспективами применения в областях экологического мониторинга, медицинской диагностики и промышленной автоматизации.

## Методы исследования

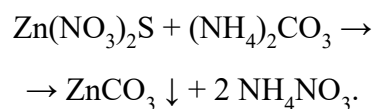
### Материалы и методы

Для синтеза использовались высокочистые реактивы аналитического класса: ацетат цинка ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ), гидрокарбонат аммония ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ), nanoграфитовый материал (NGM), этанол (аналитический класс) и этилцеллюлоза, приобретённые у ведущих поставщиков BDH, Merck и Sigma-Aldrich. В процессе синтеза и промывки применялась деионизированная вода для исключения ионного и органического загрязнения. В качестве подложек для изготовления сенсорных устройств использовалось стекло с покрытием из фтор-легированного оксида олова (FTO). Для формирования устройств применялись медные и серебряные электроды.

Перед использованием все подложки и компоненты подвергались тщательной очистке – сначала в растворе моющего средства Liquinox (Alconox Inc.), а затем ополаскивались ацетоном аналитического класса (Sigma-Aldrich) для удаления органических загрязнений и обеспечения чистой поверхности без загрязняющих частиц.

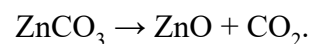
### Синтез наночастиц оксида цинка (ZnO) методом химического осаждения

Для получения прекурсора наночастиц ZnO 10 мл раствора нитрата цинка ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ) концентрации 1,5 моль/л медленно добавляли к 10 мл раствора карбоната аммония ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ) концентрации 2,25 моль/л при постоянном магнитном перемешивании. Образование белого осадка карбоната цинка ( $\text{ZnCO}_3$ ) свидетельствовало об успешном протекании реакции [1]:



Осадок отделяли вакуумной фильтрацией через фильтровальную бумагу с оптимальным размером пор для удаления жидких побочных продуктов и непрореагировавших веществ. Затем осадок промывали трижды деионизированной водой для удаления остатков реагентов. Для ускорения сушки и предотвращения агломерации использовали этанол, обладающий высокой летучестью.

Высушенный при 80 °C порошок  $\text{ZnCO}_3$  подвергали кальцинации в муфельной печи при 550 °C в течение 2 часов, что обеспечивало термическое разложение карбоната цинка с образованием наночастиц оксида цинка согласно уравнению



### Легирование наночастиц ZnO nanoграфитовым материалом (NGM)

Исходные порошки ZnO и NGM диспергировали отдельно в этаноле для обеспечения равномерного распределения. Затем суспензию NGM капельно вводили в раствор ZnO при непрерывном перемешивании в течение 25 минут для достижения гомогенного смешивания. Массовые соотношения ZnO и NGM варьировали для получения композитов с содержанием NGM 1, 2, 3, 4, 5 и 10 % (соответственно 99:1, 98:2, 97:3, 96:4,

95:5 и 90:10). Для улучшения диспергирования и снижения поверхностного натяжения дополнительно добавляли 10 мл этанола в качестве дисперсанта. Полученную пасту сушили при температуре 50–70 °С в течение 1–2 часов, что позволяло предотвратить агломерацию наночастиц и обеспечить равномерное распределение нанографита в матрице.

### Изготовление датчика влажности

Подложки из стекла, покрытого фтор-легированным оксидом олова (FTO), последовательно подвергались ультразвуковой очистке в нескольких средах – моющем растворе, деионизированной воде, ацетоне и этаноле. Такая многоступенчатая очистка обеспечивала оптимальное сцепление сенсорного слоя с подложкой и стабильность работы датчика.

Наночастицы ZnO, легированные нанографитовым материалом (NGM), диспергировали в этаноле до получения вязкой пасты, пригодной для нанесения посредством ножевого устройства. Паста равномерно наносилась на подготовленные подложки FTO с помощью данного устройства. После нанесения образцы подвергались термической обработке при температуре 150 °С в течение 1 часа с целью улучшения адгезии пленки, испарения остатков растворителей и повышения долговечности покрытия. На рис. 1, а и б представлены пасты из ZnO, легированного NGM, которые были нанесены на стеклянные подложки, покрытые фтор-легированным оксидом олова (FTO).

В этаноле при постоянном перемешивании растворяли этилцеллюлозу в концентрации

2–10 вес. % для дополнительной стабилизации сенсорного слоя и повышения его механической прочности. Полученный однородный раствор постепенно вводили в пасту ZnO-NGM, что способствовало улучшению адгезии, сглаживанию поверхности и повышению механической прочности покрытия. Введение этилцеллюлозы обеспечивало формирование стабильных и равномерных нанокompозитных слоёв, оптимальных для сенсорного контроля влажности [1, 30].

Для дальнейшей стабилизации пленки и повышения ее устойчивости этилцеллюлозу (2–10 масс. %) растворяли в этаноле при постоянном перемешивании для получения однородного раствора. Этот раствор постепенно добавляли в пасту ZnO, модифицированную NGM, для достижения оптимального покрытия. Введение этилцеллюлозы улучшало адгезию, гладкость поверхности и механическую прочность, что позволяло получать стабильные однородные нанокompозитные слои для применения в датчиках влажности [1, 30].

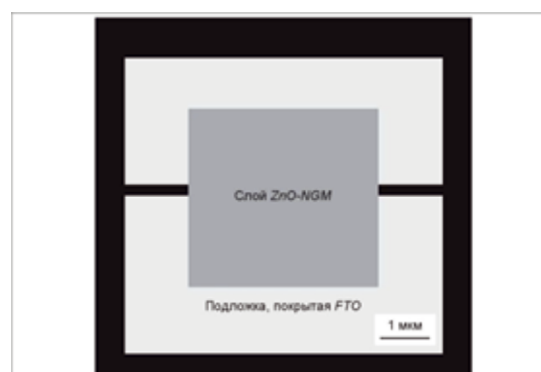
## Результаты и их обсуждение

### Структурный и морфологический анализ

Оптические свойства синтезированных наночастиц ZnO были исследованы методом оптической спектроскопии (UV-visible spectroscopy) с использованием спектрофотометра UV-1800 SHIMADZU. Спектр поглощения (рис. 2) демонстрирует выраженный и интенсивный край фундаментального поглощения вблизи 367 нм, соответствующий энергии межзонного перехода ZnO. Рассчитанная по краю поглощения шири-



а



б

Рис. 1. Вид сбоку пасты ZnO-NGM (оксид цинка – нанографитовый материал), нанесенной на подложку FTO (а); вид сверху, демонстрирующий морфологию поверхности (б)

Fig. 1. Side-view of ZnO-NGM paste on FTO substrate (a); top view showing surface morphology (b)



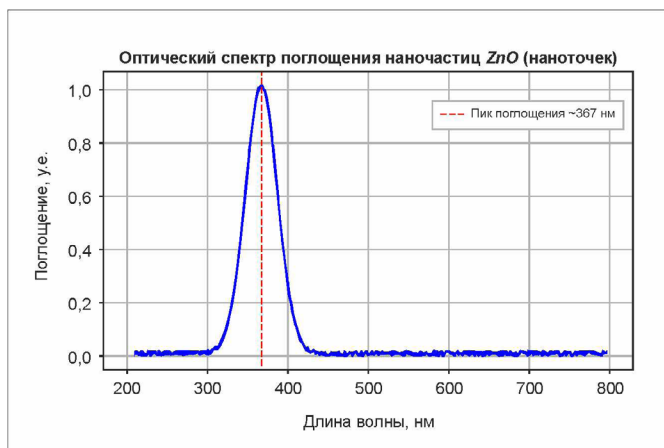


Рис. 2. Спектр поглощения в УФ- и видимой области синтезированных наночастиц ZnO, демонстрирующий узкий пик поглощения при 367 нм, что указывает на прямой тип запрещенной зоны и подтверждает наличие нанокристаллической структуры, пригодной для оптоэлектронных и сенсорных применений

Fig. 2. UV-Vis absorption spectrum of as-synthesized ZnO nanoparticles exhibiting a narrow absorption peak at 367 nm, suggesting a direct bandgap transition and validating nanoscale crystallinity for optoelectronic and sensing purposes

на запрещенной зоны прямого типа составляет приблизительно 3,38 эВ, что подтверждает полупроводниковый характер полученных наноструктур ZnO. Наблюдаемый сдвиг края поглощения в коротковолновую область (синий сдвиг) относительно положения края поглощения для массивного ZnO (~375 нм) указывает на проявление эффекта квантового ограничения, характерного для наночастиц малого размера. Резкий и крутой наклон кривой поглощения свидетельствует о высокой степени кристалличности и чистоте синтезированных наночастиц ZnO. Такие оптические характеристики делают материал перспективным для применения в датчиках

влажности, УФ-фотодетекторах и других оптоэлектронных устройствах, требующих быстрого и чувствительного отклика на внешние воздействия.

На снимках SEM (сканирующая электронная микроскопия) (рис. 3) видно, что наночастицы ZnO хорошо распределены и имеют четко выраженную морфологию. Снимки, полученные на большом увеличении, демонстрируют хорошо диспергированные частицы с развитой текстурой поверхности и наблюдаемой агломерацией в отдельных областях. Сканирование было выполнено с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6490A (JEOL Ltd., Japan). Добавление NGM повысило шероховатость поверхности и улучшило равномерность распределения. Повышенная шероховатость увеличивает количество активных центров, что способствует лучшей адсорбции молекул воды, необходимой для повышения эффективности датчика влажности [3].

Результаты рентгенофазового анализа (РФА) подтвердили формирование кристаллической структуры гексагонального типа (кварцита) в образцах ZnO. Увеличение концентрации NGM приводило к уширению и незначительным сдвигам дифракционных пиков, что свидетельствует об успешном внедрении NGM в кристаллическую решетку ZnO. Вероятно, наблюдаемые сдвиги обусловлены деформацией кристаллической решетки. Эта деформация способствует уменьшению размера кристаллитов и увеличению концентрации структурных дефектов, что, в свою очередь, может приводить к увеличению удельной площади поверхности и адсорбционной способности материала [3].

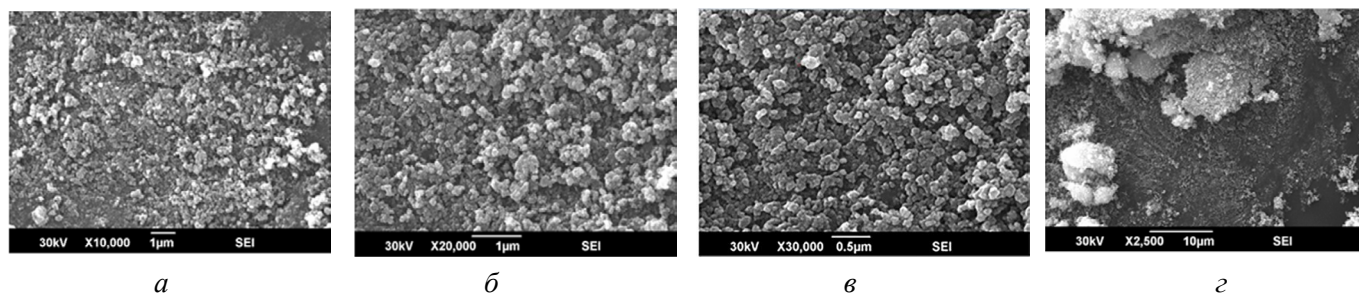


Рис. 3. SEM-изображения наночастиц ZnO, полученные при различных увеличениях: а –  $\times 10\,000$ ; б –  $\times 20\,000$ ; в –  $\times 30\,000$ ; г –  $\times 2\,500$

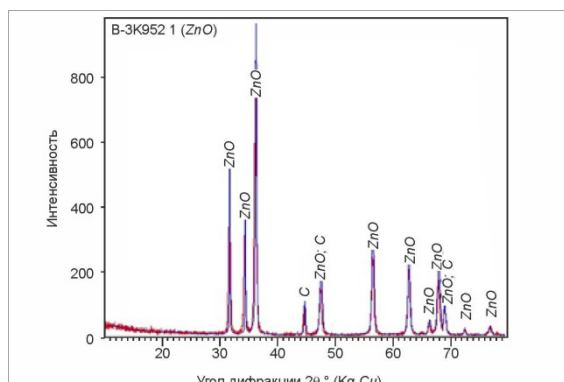
Fig. 3. Scanning electron microscopy (SEM) images of ZnO nanoparticles at different magnifications: а –  $10,000\times$ ; б –  $20,000\times$ ; в –  $30,000\times$ , and г –  $2,500\times$

На рис. 4 представлены дифрактограммы исследованных образцов. **Образец 1** (В-3К953) демонстрирует ряд рефлексов в диапазоне  $2\theta$  от  $20^\circ$  до  $80^\circ$  с наиболее интенсивными пиками вблизи  $30^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $50^\circ$ , характерными для ZnO. Отмечаются также следы примесных фаз. **Образец 2** (В-3К954) отличается более узкими и интенсивными пиками, что указывает на более высокую степень кристалличности по сравнению с образцом 1. **Образец 3** (В-3К955) характеризуется промежуточной степенью кристалличности. Анализ дифрактограмм подтверждает, что во всех образцах основной фазой является ZnO. Вариации в ширине и интенсивности дифракционных пиков, вероятно, связаны с различиями в степени кристалличности, обусловленными разным содержанием легирующей примеси NGM и условиями синтеза/обработки [3].

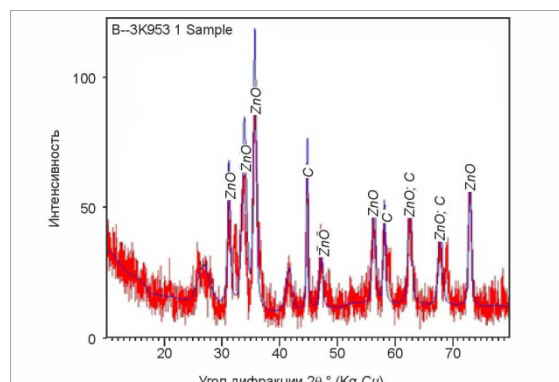
Данные инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) подтверждают внедрение NGM в матрицу ZnO (рис. 5). Характерные полосы валентных колебаний связи Zn-O,

наблюдаемые в области  $\sim 450\text{ см}^{-1}$ , подтверждают присутствие фазы ZnO. В спектрах NGM идентифицированы полосы, соответствующие валентным колебаниям связей C=C ( $\sim 1570\text{ см}^{-1}$ ) и C=O ( $\sim 1730\text{ см}^{-1}$ ), что свидетельствует о наличии углеродсодержащих функциональных групп. Широкая полоса в области  $\sim 3400\text{ см}^{-1}$  соответствует валентным колебаниям O-H-групп, которые обусловлены гидроксильными группами, ответственными за адсорбционную способность материала по отношению к воде.

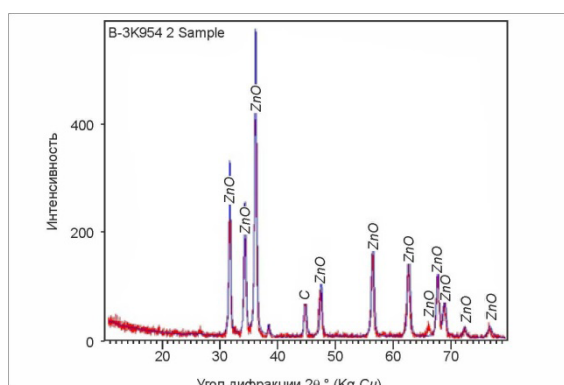
В спектрах образцов ZnO, легированных NGM, наблюдаются характерные полосы колебаний Zn-O (в области  $400\ldots 600\text{ см}^{-1}$ ) и O-H ( $\sim 3400\text{ см}^{-1}$ ). Спектр NGM характеризуется полосами валентных колебаний C=C ( $\sim 1600\text{ см}^{-1}$ ), C-O ( $\sim 1400\text{ см}^{-1}$ ) и деформационных колебаний C-H (в области  $1100\ldots 1200\text{ см}^{-1}$ ), что типично для  $sp^2$ -гибридизованных углеродных структур. В спектрах композитов ZnO-NGM наблюдаются сдвиги и увеличение интенсивности полос, особенно для Zn-O и C=C, это указывает на форми-



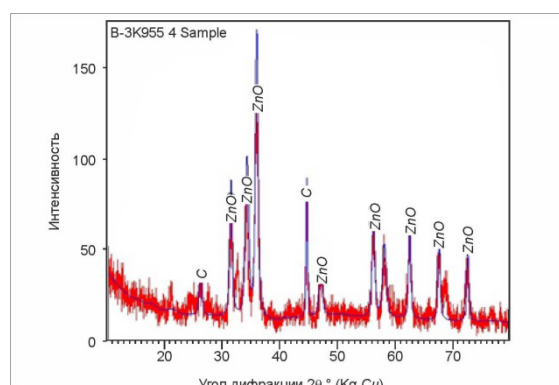
а



б



в



г

Рис. 4. Дифрактограммы:

а – чистый ZnO; б – ZnO-NGM образец 1; в – образец 2; г – образец 3

Fig. 4. XRD patterns of:

(a) pure ZnO; (б) ZnO-NGM Sample 1, (в) Sample 2, and (г) Sample 3

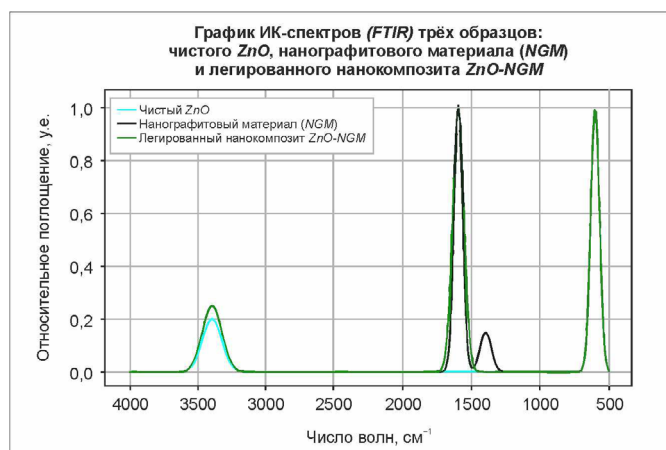


Рис. 5. ИК-спектры чистого ZnO, нанографитового материала (NGM) и легированного нанокompозита ZnO-NGM

Fig. 5. FTIR spectra of pure ZnO, nanographite material (NGM), and NGM-doped ZnO composites

рование прочной химической связи между ZnO и NGM и подтверждает успешность легирования. Уширение полосы О-Н свидетельствует об увеличении числа водородных связей, что, в свою очередь, повышает смачиваемость поверхности материала.

Таким образом, данные микроскопии и спектроскопии подтверждают успешное внедрение NGM в структуру ZnO. Увеличенная площадь поверхности, деформация кристаллической решетки, химическая функционализация и увеличение количества гидроксильных групп вносят вклад в улучшение характеристик датчика влажности и повышение адсорбции воды. Уменьшенный размер кристаллитов и повышенная концентрация дефектов также способствуют улучшению переноса заряда, что положительно сказывается на скорости отклика и чувствительности датчика влажности.

Анализ данных ИК-Фурье-спектроскопии указывает на присутствие функциональных групп, характерных для ZnO и углеродных материалов, как в исходных компонентах, так и в композите ZnO-NGM. Сдвиги в положениях и изменения интенсивностей полос поглощения указывают на успешное легирование ZnO нанографитовым материалом (NGM).

### Исследование электрических характеристик и эффективности измерения влажности

Для сравнения электрических характеристик датчиков влажности на основе ZnO-NGM и оценки эффективности измерения использо-

валась камера с контролируемой влажностью. Датчик помещался в герметичную камеру, где относительная влажность (RH) прецизионно регулировалась в диапазоне от 10 до 90 % с применением двухканальной системы подачи азота. Первый канал пропускал азот через резервуар с дистиллированной водой для увлажнения, а второй канал подавал сухой азот. Относительная влажность в камере регулировалась путем изменения соотношения потоков азота по двум каналам.

Контроль относительной влажности осуществлялся с помощью цифрового гигрометра с точностью  $\pm 0,8$  % RH, расположенного в непосредственной близости от исследуемого датчика. Температура окружающей среды поддерживалась на постоянном уровне  $23 \pm 1$  °C. Для минимизации влияния электрического шума датчик подключался к прецизионному измерителю иммитанса Fluke PM6304/023 с использованием экранированных соединительных кабелей (клемм) (рис. 6). Автоматизированный сбор данных, отображение графиков в реальном времени и сохранение измеренных значений ёмкости осуществлялись с помощью скрипта, разработанного на языке Python. Ёмкость датчика регистрировалась на частотах 10, 20, 50, 80, 100 кГц и 1 МГц при различных уровнях относительной влажности.

Датчик с 2 % ZnO-NGM демонстрировал четкую монотонную зависимость увеличения ёмкости от роста относительной влажности, об-

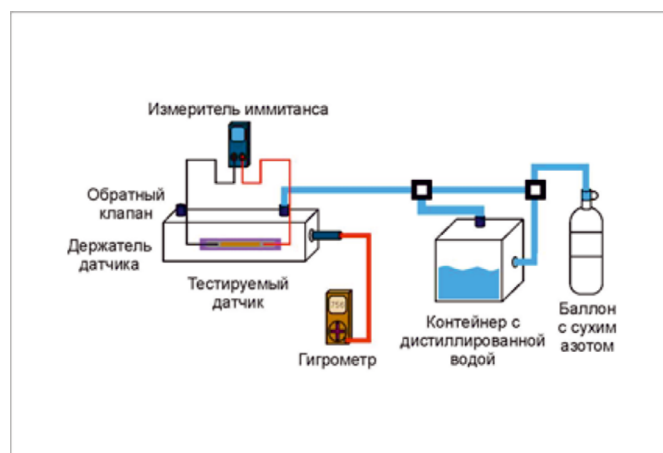


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для измерения влажности с использованием измерителя иммитанса и камеры с контролируемой влажностью  
Fig. 6. Experimental setup for humidity sensing using an LCR meter and a controlled chamber

условленную адсорбцией молекул воды и последующим увеличением дипольной поляризации материала. Благодаря увеличенной площади поверхности и путям проводимости, обеспечиваемым нанохлопьями NGM, датчик с указанной концентрацией легирующей примеси показал более высокую чувствительность по сравнению с датчиком на основе чистого ZnO. Композитная структура способствовала увеличению ионной проводимости за счет адсорбированных слоев воды и повышению диэлектрической проницаемости за счет межфазной поляризации. Время отклика составило 4,5 с, а время восстановления – 6,9 с, что свидетельствует об эффективной кинетике процессов адсорбции и десорбции. Кривая зависимости ёмкости от относительной влажности (рис. 7, а) подтверждает умеренную чувствительность и надежное отслеживание изменений влажности, особенно в диапазоне низких частот.

Датчик с 4 % ZnO-NGM продемонстрировал сбалансированное сочетание высокой чувствительности, короткого времени отклика и времени восстановления. Ёмкость резко возрастала в диапазоне относительной влажности от 10 до 60 % с последующим замедлением роста при более высоких значениях RH. Наблюдалась высокая степень корреляции между измеренной ёмкостью и относительной влажностью. На более низких частотах (10...80 кГц) датчик демонстрировал повышенную чувствительность, обусловленную усилением дипольной релаксации и ионной проводимости. На частоте 1 МГц отклик ёмкости становился менее выраженным из-за ограничений, связанных со временем релаксации поляризации. Время отклика составило 4,0 с, а время восстановления – 6,2 с, что является одним из самых низких значений, зарегистрированных для датчиков с различными концентрациями NGM. Кривая зависимости ёмкости от относительной влажности (рис. 7, б) также подтверждает умеренную чувствительность и надежное отслеживание изменений влажности в диапазоне низких частот.

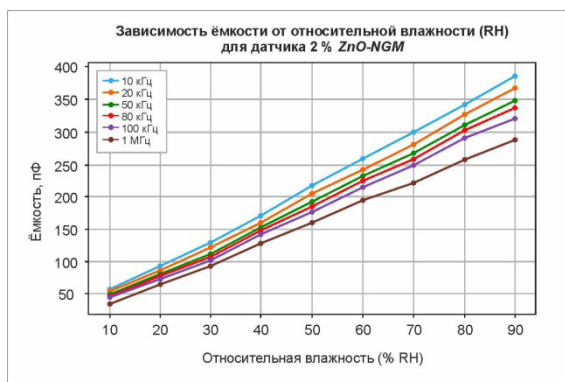
Датчик с 1 % ZnO-NGM характеризовался умеренной чувствительностью по ёмкости, а также умеренными значениями времени отклика и времени восстановления. Ёмкость увеличивалась с ростом относительной влажности вследствие диэлектрической поляризации, ин-

дуцированной адсорбированными молекулами воды. На более низких частотах (10 и 50 кГц) чувствительность датчика была выше, в то время как на высокой частоте (1 МГц) отклик поляризации был ограничен, что приводило к более пологой зависимости ёмкости от относительной влажности. Время отклика составило 4,8 с, а время восстановления – 6,9 с, что демонстрирует незначительное улучшение характеристик по сравнению с чистым ZnO. Кривая зависимости ёмкости от относительной влажности (рис. 7, в) подтверждает умеренную чувствительность и надежное отслеживание изменений влажности в диапазоне низких частот.

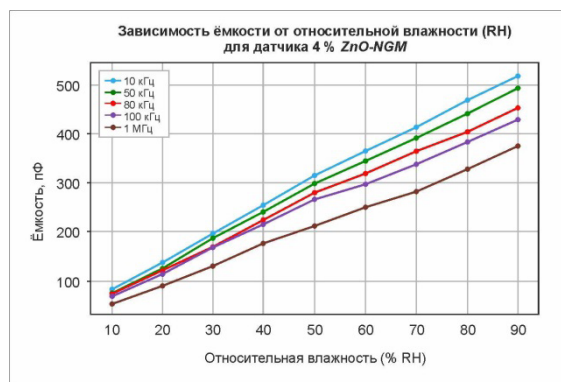
Датчик с 5 % ZnO-NGM продемонстрировал высокую чувствительность к изменению уровня влажности, характеризующуюся значением 53,9 пФ/% RH. Ёмкость резко возрастала в диапазоне от 10 до 60 % RH с последующим замедлением роста при более высоких значениях влажности. Несмотря на значительно более высокую чувствительность по сравнению с датчиками с меньшими концентрациями NGM, время отклика и время восстановления (4,2 и 6,6 с соответственно) несколько увеличились, что может быть связано с частичной агломерацией нанохлопьев NGM и, как следствие, с уменьшением количества доступных активных центров для адсорбции. Несмотря на ухудшение кинетических параметров, данный датчик демонстрирует высокую чувствительность и может быть рекомендован для применений, в которых чувствительность является приоритетным параметром по сравнению со скоростью отклика. Кривая зависимости ёмкости от относительной влажности (рис. 7, г) тем не менее также подтверждает умеренную чувствительность и надежное отслеживание изменений влажности в диапазоне низких частот.

Среди всех исследованных концентраций легирующей добавки NGM датчик, содержащий 10 % ZnO-NGM, продемонстрировал максимальную чувствительность по ёмкости, составляющую 62,1 пФ/% RH. Однако время отклика (6,0 с) и время восстановления (8,0 с) данного датчика были больше, чем у датчиков с меньшим содержанием NGM. Вероятно, замедленная кинетика адсорбции/десорбции обусловлена агломерацией NGM при высокой концентрации легирующей добавки, что приводит к умень-





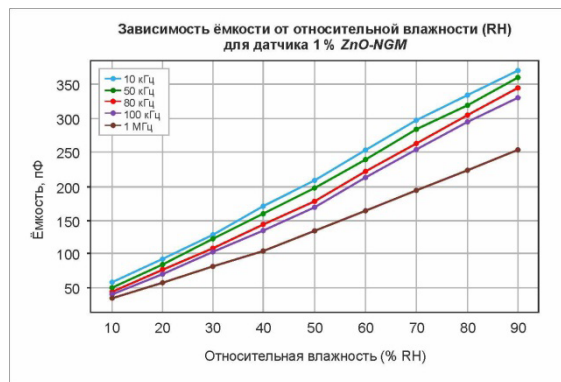
а



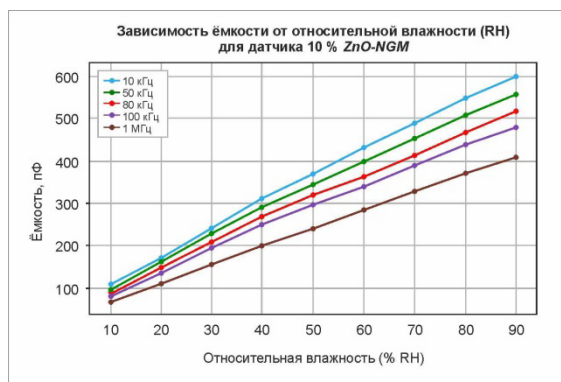
б



в



г



д

Рис. 7. Зависимость ёмкости от относительной влажности для датчиков ZnO-NGM с концентрацией легирующей примеси 2 % (а), 4 % (б), 1 % (в), 5 % (г) и 10 % (д)

Fig. 7. Capacitance as a function of RH for ZnO-NGM sensors with (a) 2 wt. %, (б) 4 wt. %, (в) 1 wt. %, (г) 5 wt. %, and (д) 10 wt. % NGM doping

шению эффективной площади поверхности, доступной для адсорбции молекул воды, и, как следствие, к снижению ионной подвижности. Несмотря на указанные ограничения, датчик на основе ZnO с содержанием 10 % NGM характеризуется наилучшей чувствительностью, что является приоритетным параметром для многих применений, даже если это достигается за счет некоторого снижения скорости отклика. Зависимость ёмкости датчика от относительной влажности, представленная на рис. 7, д, подтверж-

дает удовлетворительную чувствительность и хорошее отслеживание изменения влажности в диапазоне низких частот [31].

Динамические характеристики датчиков оценивались на основе времени отклика и времени восстановления. Время отклика определялось как время, необходимое для достижения 90 % от полного изменения ёмкости при резком изменении относительной влажности, а время восстановления – как время, необходимое для возврата ёмкости к 10 % от исходного значения после уда-

ления влаги. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Нелегированный ZnO демонстрировал время отклика 5,0 с и время восстановления 7,0 с. Легирование NGM привело к значительному улучшению динамических характеристик. В частности, датчик с 4 % ZnO-NGM продемонстрировал оптимальное сочетание короткого времени отклика (4,0 с) и времени восстановления (6,2 с). Это свидетельствует об улучшенной кинетике процессов адсорбции и десорбции молекул воды, обусловленной синергетическим эффектом пористой структуры ZnO и высокой электропроводности NGM, обеспечивающей эффективный перенос заряда.

Однако при увеличении концентрации NGM ( $\geq 5$  %) наблюдалось возрастание времени отклика и времени восстановления. Например, датчик с 10 % ZnO-NGM характеризовался более длительным временем отклика (6,0 с) и временем восстановления (8,0 с), что, вероятно, связано с агломерацией наночастиц NGM. Агломерация приводит к уменьшению количества активных центров адсорбции и затрудняет диффузию молекул воды. Это снижает скорость отклика датчика, несмотря на высокую чувствительность по ёмкости.

Зависимость изменения ёмкости датчиков от относительной влажности при различных концентрациях легирующей примеси NGM представлена на рис. 8, а. Чистый ZnO демонстрировал базовую чувствительность, составляющую 18,5 пФ/% RH. Введение NGM существенно

улучшило чувствительность датчиков. Хотя максимальная чувствительность (62,1 пФ/% RH) была достигнута при концентрации NGM 10 %, это сопровождалось ухудшением динамических характеристик (увеличением времени отклика и времени восстановления). Датчики с 4 и 5 % ZnO-NGM обеспечили наилучший компромисс между высокой чувствительностью и приемлемым временем отклика/восстановления, что делает их наиболее перспективными кандидатами для применения в системах мониторинга влажности в реальном времени.

Для анализа характеристик в реальном времени было исследовано поведение отклика и восстановления датчика влажности на основе ZnO-NGM (рис. 8, б). Наилучшие значения времени отклика (4,0 с) и времени восстановления (6,2 с) были получены при 4 % ZnO-NGM, что обусловлено синергией между большой площадью поверхности ZnO и превосходными свойствами NGM по переносу заряда. При концентрации легирующей примеси выше 5 % характеристики ухудшались, поскольку агломерация NGM уменьшала количество активных центров адсорбции и затрудняла подвижность электронов. При концентрации легирующей примеси 10 % время отклика и время восстановления увеличивались до 6,0 и 8,0 с соответственно.

Итак, контролируемое легирование ZnO на-нографитовым материалом (NGM) позволяет существенно улучшить характеристики датчиков влажности на основе ZnO, нивелируя недостатки, присущие традиционным датчикам на основе

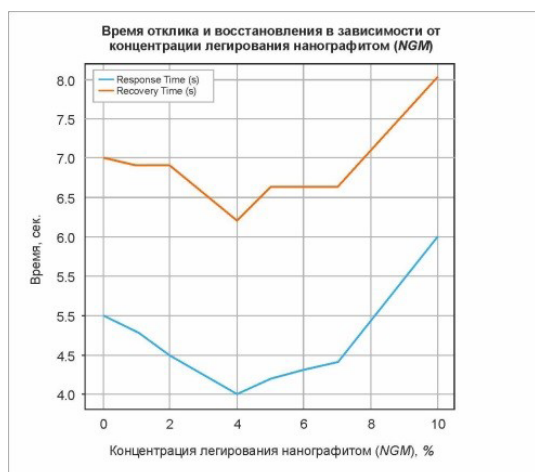
Таблица 1

Table 1

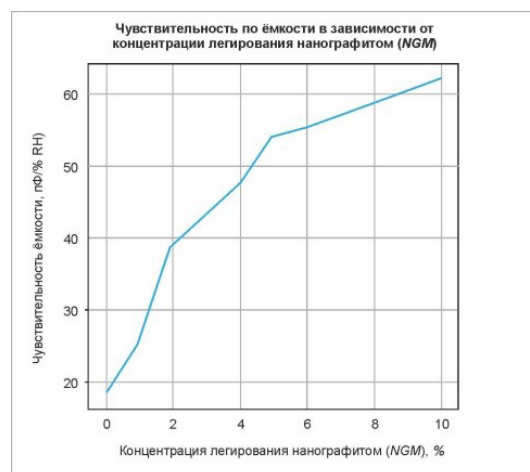
**Влияние легирования нанографитовым материалом (NGM) на чувствительность по ёмкости, время отклика и время восстановления датчиков влажности на основе ZnO**

**Effect of NGM doping on capacitance sensitivity, response time, and recovery time of ZnO-based humidity sensors**

| Концентрация NGM / NGM Doping     | Чувствительность по ёмкости, пФ/% RH / Capacitance sensitivity (pF/% RH) | Время отклика, с / Response time (s) | Время восстановления, с / Recovery time (s) |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| 0 % (чистый ZnO) / 0 % (pure ZnO) | 18,5                                                                     | 5                                    | 7                                           |
| 1 %                               | 25,2                                                                     | 4,8                                  | 6,9                                         |
| 2 %                               | 38,7                                                                     | 4,5                                  | 6,9                                         |
| 4 %                               | 47,3                                                                     | 4,0                                  | 6,2                                         |
| 5 %                               | 53,9                                                                     | 4,2                                  | 6,6                                         |
| 7 %                               | 56,8                                                                     | 4,4                                  | 6,6                                         |
| 10 %                              | 62,1                                                                     | 6                                    | 8                                           |



а



б

Рис. 8. Зависимость времени отклика и времени восстановления от концентрации NGM (а); зависимость чувствительности по ёмкости от концентрации NGM (б)

Fig. 8. Response and recovery times as a function of NGM doping level (а); capacitance sensitivity as a function of NGM doping level (б)

оксидов металлов. Оптимизированные композиции ZnO-NGM по своим характеристикам превосходят современные аналоги или, по крайней мере, соответствуют им, демонстрируя высокий потенциал для применения в различных областях, таких как мониторинг окружающей среды, автоматизированные промышленные системы и биомедицинская диагностика.

Циклические характеристики датчика (например, датчика с 4 % NGM) представлены на рис. 9, который иллюстрирует зависимость ёмкости и относительной влажности от времени на протяжении 1000 секунд. Анализ графика показывает, что ёмкость датчика (двухцветная

красно-голубая пунктирная линия) точно отслеживает изменения относительной влажности (красные квадраты), что свидетельствует о высокой степени синхронизации и повторяемости отклика датчика.

Наличие крутых участков на графике в моменты изменения относительной влажности свидетельствует о быстром времени отклика и времени восстановления датчика. Регулярный и периодический характер кривой зависимости ёмкости от времени подтверждает стабильность, воспроизводимость результатов и пригодность разработанного датчика для динамического мониторинга параметров окружающей среды.

#### Исследование чувствительности по ёмкости и частотных характеристик

Легирование ZnO нанографитовым материалом (NGM) позволило значительно повысить чувствительность по ёмкости датчиков влажности. Максимальное значение относительного изменения ёмкости, достигающее 65 относительных единиц, наблюдалось для датчика с концентрацией NGM 5 % при относительной влажности 90 % (рис. 10, в). Данный эффект обусловлен высокой электропроводностью и развитой удельной поверхностью NGM, что способствует увеличению накопления заряда и адсорбции молекул воды [8]. Увеличение концентрации легирующей добавки NGM свыше 5 % приводило к снижению ёмкости вследствие

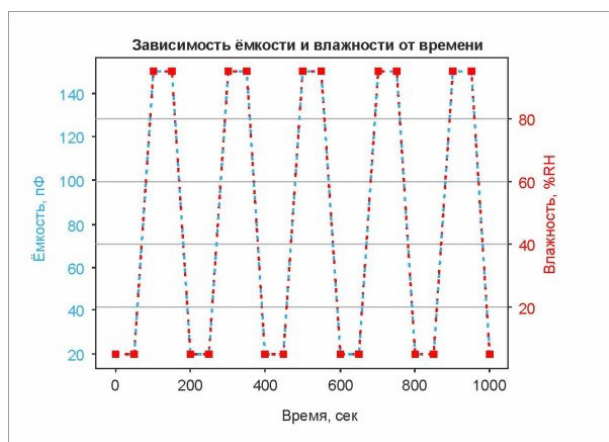
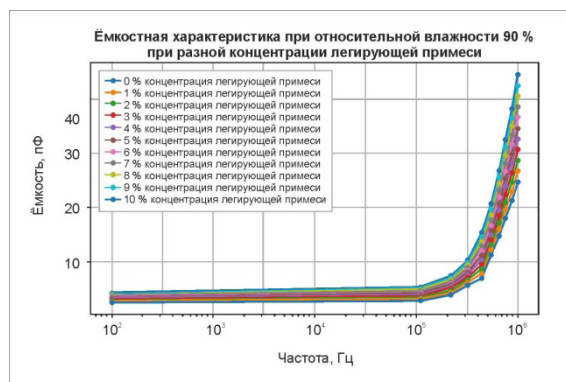
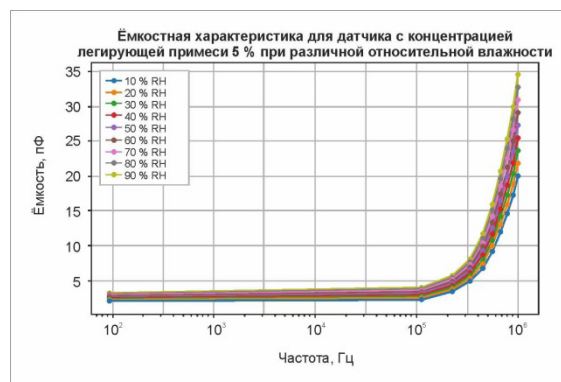


Рис. 9. Циклические изменения ёмкости и влажности в течение 1000 с, демонстрирующие стабильность датчика

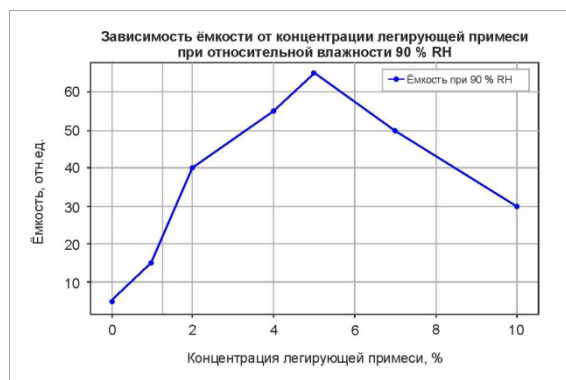
Fig. 9. Cyclic capacitance and humidity variation over 1,000 s, demonstrating sensor stability



а



б



в



г

Рис. 10. Ёмкостная характеристика при относительной влажности 90 % при разной концентрации легирующей примеси (а); ёмкостная характеристика для датчика с концентрацией легирующей примеси 5 % при различной относительной влажности (б); зависимость ёмкости от концентрации легирующей примеси при относительной влажности 90 % RH (в); зависимость ёмкости от относительной влажности при разных частотах (концентрация легирующей примеси 5 %) (г)

Fig. 10. Capacitive response at 90% RH (a); response for 5 wt.% NGM doping (б); capacitance as a function of doping level at 90% RH (в); capacitance as a function of RH at different frequencies (5 wt. % NGM doping) (г)

агломерации наночастиц NGM, что ограничивало эффективную площадь поверхности и количество активных центров адсорбции.

Анализ частотной зависимости ёмкости (рис. 10, а и б) показал, что наибольшее изменение ёмкости наблюдается на низких частотах (менее 10 кГц), это связано с усилением процессов поляризации. На более высоких частотах (более 100 кГц) чувствительность датчиков снижалась, что обусловлено более быстрой релаксацией носителей заряда и, как следствие, ограничением подвижности молекул воды, препятствующим их выстраиванию вдоль электрического поля [9]. Результаты, представленные на рис. 7, г, также подтверждают, что датчик с концентрацией легирующей добавки NGM 5 % демонстрирует высокую чувствительность к изменению относительной влажности во всем исследованном диапазоне частот, особенно в области низких частот.

### Исследование влияния материала электродов на характеристики датчика

В рамках исследования было проведено сравнение влияния различных материалов электродов (FTO, серебро и медь) на характеристики разработанных датчиков влажности. Электроды на основе FTO обеспечивали наиболее стабильный и воспроизводимый отклик датчика, что, вероятно, обусловлено высокой химической стойкостью данного материала и хорошей адгезией к слою сенсорного материала (ZnO-NGM). Использование серебряных электродов приводило к увеличению чувствительности датчиков, что, вероятно, связано с более высокой электропроводностью серебра, обеспечивающей эффективный перенос заряда. В то же время медные электроды демонстрировали незначительное ухудшение характеристик датчика в процессе



эксплуатации. Это может быть обусловлено процессами окисления меди, приводящими к увеличению контактного сопротивления и снижению чувствительности сенсора [32].

### *Сравнение с существующими датчиками*

Для оценки конкурентоспособности разработанных датчиков ZnO-NGM было проведено сравнение их характеристик с характеристиками различных датчиков влажности на основе углеродных материалов и оксидов металлов, представленных в научной литературе.

Например, датчики на основе грам-углеродных квантовых точек демонстрируют высокую чувствительность (178,6...254,86 пФ/% RH), однако характеризуются относительно длительным временем отклика и временем восстановления (7,3...14,1 с), что затрудняет их применение для обнаружения низких концентраций влажности и в условиях быстро меняющейся влажности. Композитные датчики на основе PAA-MWCNT (полиакриловая кислота – многослойные углеродные нанотрубки) демонстрируют заметное изменение сопротивления (930 Ом) при изменении влажности, но обладают крайне длительным временем отклика (680 с) и временем восстановления (380 с), что существенно ограничивает область их применения. Датчики на основе PEDOT (поли(3,4-этилендиокситиофена)), модифицированного оксидом графена (GO), хотя и обладают высокой чувствительностью к влажности (4,97 % при 97 % RH), также характеризуются длительным временем отклика (31 с) и временем восстановления (72 с). Другие датчики на основе графена, включая композиты Fe-GO и GO/WS<sub>2</sub>, демонстрируют умеренные характеристики, но, как правило, имеют либо низкую чувствительность, либо длительное время отклика и восстановления. Датчики на основе GO с аномально высокой чувствительностью (например, 37 800 %) часто демонстрируют длительное время восстановления (~41 с) или нестабильны при низких значениях относительной влажности, что ограничивает их применение в реальных условиях.

В табл. 2 представлено сравнение ключевых характеристик (чувствительность, время отклика, время восстановления) разработанных датчиков ZnO-NGM с характеристиками различных датчиков влажности на основе наноматериалов, опубликованных в научной литературе.

Результаты сравнения показывают, что, несмотря на высокую чувствительность некоторых материалов (например, грам-углеродных квантовых точек), длительное время отклика и время восстановления (до 14,1 с) ограничивают их применение в динамических условиях. Композиты, такие как PAA-MWCNT, демонстрируют значительное изменение сопротивления, но крайне длительное время отклика и время восстановления делает их непригодными для измерения влажности в реальном времени. Датчики на основе PEDOT/GO демонстрируют аналогичную проблему с медленным откликом. Датчики Fe-GO и GO/WS<sub>2</sub> характеризуются лучшей скоростью, но относительно низкой чувствительностью, особенно при низких значениях относительной влажности.

В отличие от перечисленных выше материалов датчики ZnO-NGM, разработанные в рамках настоящего исследования, демонстрируют сбалансированный и улучшенный профиль характеристик. Датчик на основе ZnO с 5 % NGM демонстрирует чувствительность 53,9 пФ/% RH, время отклика 4,2 с и время восстановления 6,6 с, что превосходит характеристики многих из представленных аналогов и обеспечивает значительно лучший динамический отклик при сохранении хорошей чувствительности. При более низких концентрациях NGM (2 %) датчик сохраняет короткое время отклика (4,5 с) и время восстановления (6,9 с) с умеренной чувствительностью 38,7 пФ/% RH.

Важно отметить, что в отличие от многих датчиков влажности на основе углеродных материалов, характеризующихся нестабильностью и разбросом характеристик при различных уровнях относительной влажности, датчики на основе ZnO, легированного NGM, демонстрируют стабильную и воспроизводимую работу в широком диапазоне относительной влажности (10–95 %). Это делает их перспективными для применения в системах мониторинга параметров окружающей среды и промышленных системах в реальном времени. Простота изготовления данных датчиков, основанная на использовании недорогих материалов и экономичного метода нанесения ракелем на подложки FTO, является дополнительным фактором, определяющим их высокую практическую ценность.

Результаты структурного и морфологического анализа подтвердили успешное внедрение

Таблица 2

Table 2

### Сравнение последних разработок в области нанодатчиков влажности

#### Comparison of recent nano humidity sensors

| №  | Материал датчика                                                                                                 | Чувствительность, пФ/% RH или %  | Время отклика, с | Время восстановления, с | Ссылка на источник | Ключевой вывод                                                                                                                     |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Грам-углеродные квантовые точки (C-1, C-2) / Gram Carbon Quantum Dots (C-1, C-2)                                 | 178,6...254,86                   | 13,3 / 7,3       | 14,1 / 4,7              | [33]               | – Высокая чувствительность;<br>– медленное восстановление /<br>– High sensitivity;<br>– slow recovery                              |
| 2  | PAA-MWCNT (соотношение 1:4) (полиакриловая кислота – многослойные углеродные нанотрубки) / PAA-MWCNT (1:4 ratio) | 930 Ом (изменение сопротивления) | 680              | 380                     | [34]               | – Чрезвычайно длительное время отклика и восстановления /<br>– Excessively high response/recovery time                             |
| 3  | PEDOT, модифицированный GO (поли(3,4-этилендиокситиофен), модифицированный оксидом графена) / GO-modified PEDOT  | 4,97 % при 97 % RH               | 31               | 72                      | [35]               | – Плохая динамика отклика /<br>– Poor dynamic response                                                                             |
| 4  | MWCNT в NMP (многослойные углеродные нанотрубки в N-метил-2-пирролидоне) / MWCNT in NMP                          | 6,41                             | 36               | 32                      | [36]               | – Умеренные характеристики /<br>– Moderate performance                                                                             |
| 5  | SnO <sub>2</sub> -RGO (оксид олова – восстановленный оксид графена)                                              | 146,53                           | 102              | Несколько секунд        | [37]               | – Медленный отклик при высокой RH /<br>– Slow at high RH                                                                           |
| 6  | GO (оксид графена) / GO                                                                                          | 37 800 %                         | 10,5             | 41                      | [38]               | – Очень высокая чувствительность;<br>– медленное восстановление /<br>– Very high sensitivity;<br>– long recovery                   |
| 7  | Fe-GO (железо – оксид графена) / Fe-GO                                                                           | 5,18                             | 31               | 11                      | [39]               | – Низкая чувствительность при низкой RH /<br>– Low sensitivity at low RH                                                           |
| 8  | GO (оксид графена) / GO                                                                                          | –9,5 пФ/% RH                     | 5                | –                       | [40]               | – Хорошая скорость;<br>– ограниченный диапазон /<br>– Good speed;<br>– limited range                                               |
| 9  | Композит на основе GO/WS <sub>2</sub> (оксид графена / дисульфид вольфрама) / GO/WS <sub>2</sub> Composite       | Не указано                       | 11,3             | 12,4                    | [41]               | – Стабильная работа в диапазоне 25–95 % RH /<br>– Stable performance 25–95 % RH                                                    |
| 10 | CNT@CPM (углеродные нанотрубки, иммобилизованные в полимерной матрице) / CNT@CPM (Chitosan-PAMAM                 | Не указано                       | < 20             | < 20                    | [42]               | – Высокая скорость;<br>– нет данных по чувствительности /<br>– Fast;<br>– no sensitivity data                                      |
| 11 | 5 % ZnO-NGM (данная работа) / 5% ZnO-NGM (this work)                                                             | <b>53,9</b>                      | <b>4,2</b>       | <b>6,6</b>              | Данная работа      | – Лучший баланс;<br>– высокая чувствительность;<br>– быстрый отклик /<br>– Best balance;<br>– high sensitivity;<br>– fast response |
| 12 | 2 % ZnO-NGM (данная работа) / 2% ZnO-NGM (this work)                                                             | <b>38,7</b>                      | <b>4,5</b>       | <b>6,9</b>              | Данная работа      | – Немного ниже чувствительность;<br>– по-прежнему высокая скорость /<br>– Slightly lower sensitivity;<br>– still fast              |

нанографитового материала (NGM) в матрицу ZnO. Данные рентгенофазового анализа (РФА) выявили сдвиги дифракционных пиков с увеличением содержания NGM, что свидетельствует о деформации кристаллической решетки и структурных изменениях. Изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) продемонстрировали равномерное распределение NGM в матрице ZnO, приводящее к увеличению шероховатости поверхности и образованию дополнительных активных центров для адсорбции молекул воды. Методом ИК-Фурье-спектроскопии подтверждено наличие функциональных групп (O–H и C=C), играющих важную роль в процессе адсорбции влаги.

Исследования электрических характеристик показали, что легирование ZnO наногграфитовым материалом (NGM) значительно улучшает характеристики датчика влажности. Датчик на основе ZnO с 2 % NGM продемонстрировал наиболее благоприятное сочетание динамических характеристик, характеризующееся временем отклика 4,5 с и временем восстановления 6,9 с. Данное улучшение связано с увеличением подвижности носителей заряда и повышением концентрации активных центров адсорбции. Увеличение концентрации легирующей добавки NGM свыше 5 % хотя и приводит к росту чувствительности, но сопровождается ухудшением динамических характеристик, что, вероятно, обусловлено агломерацией NGM, уменьшающей эффективную площадь поверхности и затрудняющей быструю кинетику адсорбции и десорбции молекул воды.

Сравнение полученных результатов с характеристиками датчиков влажности на основе других материалов, представленных в научной литературе, подчеркивает конкурентоспособность нанокомпозитов ZnO-NGM. Разработанные датчики демонстрируют более сбалансированное сочетание чувствительности и динамических характеристик по сравнению с традиционными датчиками, страдающими от медленного отклика и медленного восстановления. Это позволяет рассматривать датчики на основе ZnO, легированного NGM, как перспективные для применения в системах мониторинга влажности реального времени в различных областях, включая управление промышленными процессами, мониторинг окружающей среды и биомедицинскую диагностику.

В качестве направлений для дальнейших исследований следует рассмотреть оптимизацию концентрации NGM с целью одновременного улучшения чувствительности и долговременной стабильности характеристик. Кроме того, перспективным является изучение альтернативных методов формирования тонких пленок ZnO-NGM и разработка гибких датчиков влажности для носимой электроники и портативных устройств.

## Заключение

В данной работе представлен эффективный метод синтеза наночастиц ZnO, легированных наногграфитовым материалом (NGM), для создания высокоэффективных ёмкостных датчиков влажности. Методом оптической спектроскопии подтверждено наличие выраженного пика поглощения при 367 нм, свидетельствующего о полупроводниковом характере и оптической пригодности структуры ZnO. Данные рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) указывают на улучшение кристалличности и текстуры поверхности ZnO при легировании NGM, что приводит к значительному увеличению скорости адсорбции и улучшению переноса заряда.

На основании результатов исследования влияния концентрации NGM на характеристики датчика установлено, что датчик на основе ZnO с 4 % NGM демонстрирует оптимальное сочетание высокой чувствительности и быстрого отклика, характеризующееся временем отклика 4,0 с и временем восстановления 6,2 с. Увеличение концентрации NGM до 5 % и выше приводит к дальнейшему росту чувствительности по ёмкости, однако сопровождается снижением скорости отклика, что, вероятно, обусловлено агломерацией NGM и уменьшением эффективной площади поверхности. Разработанные датчики демонстрируют высокую воспроизводимость результатов, незначительный гистерезис и стабильную работу в широком диапазоне частот и относительной влажности (10–95 % RH, 10 кГц – 1 МГц).

## Список литературы

1. High-performance humidity sensor based on the graphene flower/zinc oxide composite / M. Saqib, S. Ali Khan, H.M. Mutee Ur Rehman, Y. Yang, S. Kim,

- M.M. Rehman, W. Young Kim // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11 (1). – P. 242. – DOI: 10.3390/nano11010242.
2. Stable and fast-response capacitive humidity sensors based on a ZnO nanopowder/PVP-RGO multilayer / H. Yang, Q. Ye, R. Zeng, J. Zhang, L. Yue, M. Xu, Z.-J. Qiu, D. Wu // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17 (10). – P. 2415. – DOI: 10.3390/s17102415.
3. Facile assembly of flexible humidity sensors based on nanostructured graphite/zinc oxide-coated cellulose fibrous frameworks for human healthcare / Z. Ullah, G.M. Mustafa, A.Raza, A. Khalil, A.A. Awadh Bahajjaj, R. Batool, N.I. Sonil, I. Ali, M.F. Nazar // *RSC Advances*. – 2024. – Vol. 14 (50). – P. 37570–37579. – DOI: 10.1039/D4RA05761A.
4. Hydrophobic multifunctional flexible sensors with a rapid humidity response for long-term respiratory monitoring / Y. Sun, X. Gao, A. Shiwei, H. Fang, M. Lu, D. Yao, C. Lu // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2023. – Vol. 11 (6). – P. 2375–2386. – DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c06162.
5. Fast-speed, highly sensitive, flexible humidity sensors based on a printable composite of carbon nanotubes and hydrophilic polymers / S. Ding, T. Yin, S. Zhang, D. Yang, H. Zhou, S. Guo, Q. Li, Y. Wang, Y. Yang, B. Peng, R. Yang, Z. Jiang // *Langmuir*. – 2023. – Vol. 39 (4). – P. 1474–1481. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.2c02827.
6. Selective encapsulation of ionic liquids in UiO-66-NH<sub>2</sub> nanopores for enhanced humidity sensing / K. Wu, X. Miao, H. Zhao, S. Liu, T. Fei, T. Zhang // *ACS Applied Nano Materials*. – 2023. – Vol. 6 (10). – P. 9050–9058. – DOI: 10.1021/acsanm.3c01727.
7. Self-powered graphene oxide humidity sensor based on potentiometric humidity transduction mechanism / D. Lei, Q. Zhang, N. Liu, T. Su, L. Wang, Z. Ren, Z. Zhang, J. Su, Y. Gao // *Advanced Functional Materials*. – 2022. – Vol. 32 (10). – P. 2107330. – DOI: 10.1002/adfm.202107330.
8. A highly sensitive and stable rGO: MoS<sub>2</sub>-based chemiresistive humidity sensor directly insertable to transformer insulating oil analyzed by customized electronic sensor interface / M.R. Adib, Y. Lee, V.V. Kondalkar, S. Kim, K. Lee // *ACS Sensors*. – 2021. – Vol. 6 (3). – P. 1012–1021. – DOI: 10.1021/acssensors.0c02219.
9. TiO<sub>2</sub>-SnS<sub>2</sub> nanoheterostructures for high-performance humidity sensor / W. Yu, D. Chen, J. Li, Z. Zhang // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13 (3). – P. 482. – DOI: 10.3390/cryst13030482.
10. Baig M.F.W., Hasany S.F., Shirazi M.F. Green synthesis of nano graphite materials from lemon and orange peel: A sustainable approach for carbon-based materials // *Engineering Proceedings*. – 2023. – Vol. 46 (1). – P. 42. – DOI: 10.3390/engproc2023046042.
11. Synthesis and characterization of silver–zinc oxide nanocomposites for humidity sensing / E. Dare, B. Adanu-Ogbole, F. Oladoyinbo, F. Makinde, A.O. Uzosike // *Nano Select*. – 2023. – Vol. 4 (4). – P. 255–262. – DOI: 10.1002/nano.202200106.
12. Synthesis and study of stable and size-controlled ZnO–SiO<sub>2</sub> quantum dots: Application as a humidity sensor / M.A. Mahjoub, G. Monier, C. Robert-Goumet, F. Réveret, M. Echabaane, D. Chaudanson, M. Petit, L. Bideux, B. Gruzza // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2016. – Vol. 120 (21). – P. 11652–11662. – DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b00135.
13. Heterojunctions of ZnO-nanorod-decorated WO<sub>3</sub> nanosheets coated with ZIF-71 for humidity-independent NO<sub>2</sub> sensing / L. Qian, C. Fang, Y. Gui, K. Tian, H. Guo, D. Guo, X. Guo, P. Liu // *ACS Applied Nano Materials*. – 2023. – Vol. 6(14). – P. 13216–13226. – DOI: 10.1021/acsanm.3c01955.
14. Sensing performance of nanocrystalline graphite-based humidity sensors / T.Y. Ling, S.H. Pu, S.J. Fishlock, Y. Han, J.D. Reynolds, J.W. McBride, H.M.H. Chong // *IEEE Sensors Journal*. – 2019. – Vol. 19 (14). – P. 5421–5428. – DOI: 10.1109/JSEN.2019.2905719.
15. Ultrathin glass-based flexible, transparent, and ultrasensitive surface acoustic wave humidity sensor with ZnO nanowires and graphene quantum dots / J. Wu, C. Yin, J. Zhou, H. Li, Y. Liu, Y. Shen, S. Garner, Y. Fu, H. Duan // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2020. – Vol. 12 (35). – P. 39817–39825. – DOI: 10.1021/acami.0c09962.
16. Dinç Zor Ş., Cankurtaran H. Impedimetric humidity sensor based on nanohybrid composite of conducting poly (diphenylamine sulfonic acid) // *Journal of Sensors*. – 2016. – Vol. 2016 (1). – P. 5479092. – DOI: 10.1155/2016/5479092.
17. Enhancement of the humidity sensing performance in Mg-doped hexagonal ZnO microspheres at room temperature / C. Lin, H. Zhang, J. Zhang, C. Chen // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19 (3). – P. 519. – DOI: 10.3390/s19030519.
18. Design of a humidity sensor for a PPE kit using a flexible paper substrate / P. Chaudhary, A. Verma, S. Chaudhary, M. Kumar, M.-F. Lin, Y.-C. Huang, K.-L. Chen, B.C. Yadav // *Langmuir*. – 2024. – Vol. 40 (18). – P. 9602–9612. – DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c00366.
19. Zinc oxide anchored porous reduced graphene oxide: Electrode material for sensing of ezetimibe / N.P. Agadi, N.L. Teradal, D.H. Manjunatha, J. Seetharamappa // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2024. – Vol. 171 (3). – P. 037513. – DOI: 10.1149/1945-7111/ad2f78.
20. Capacitively coupled contactless conductivity detection (C4D) of ZnO nanostructures gas sensor by





adding Au: Pd metal with response to ethanol and acetone vapor / N. Hongsith, S. Chansuriya, B. Yatmontree, S. Uai // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2653 (1). – P. 012062. – DOI: 10.1088/1742-6596/2653/1/012062.

21. Non-crystal-RuO<sub>x</sub>/crystalline-ZnO composites: controllable synthesis and high-performance toxic gas sensors / N. Luo, H. Cai, X. Li, M. Guo, C. Wang, X. Wang, P. Hu, Z. Cheng, J. Xu // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2022. – Vol. 10 (28). – P. 15136–15145. – DOI: 10.1039/D2TA02856E.

22. Electrochemical immunosensor for detection of *H. pylori* secretory protein VacA on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/ZnO nanocomposite-modified Au electrode / K. Saxena, A. Kumar, N. Chauhan, M. Khanuja, B.D. Malhotra, U. Jain // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7 (36). – P. 32292–32301. – DOI: 10.1021/acsomega.2c03627.

23. Zinc oxide-based sensor prepared by modified sol-gel route for detection of low concentrations of ethanol, methanol, acetone, and formaldehyde / R. Dhahri, M. Benamara, K.I. Nassar, E.B. Elkenany, A.M. Al-Syadi // *Semiconductor Science and Technology*. – 2024. – Vol. 39 (11). – P. 115021. – DOI: 10.1088/1361-6641/ad825e.

24. Hussain S., Hasany S., Ali S.U. Hematite decorated MWCNT nanohybrids: A facile synthesis // *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. – 2022. – Vol. 44 (5). – P. 480–489. – DOI: 10.52568/001121/JCSP/44.05.2022.

25. Doroftei C., Leontie L. Porous nanostructured gadolinium aluminate for high-sensitivity humidity sensors // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (22). – P. 7102. – DOI: 10.3390/ma14227102.

26. Enhanced acetone gas sensing performance of ZnO polyhedrons decorated with LaFeO<sub>3</sub> nanoparticles / H. Zhang, L. Liu, C. Huang, S. Liang, G. Jiang // *Materials Research Express*. – 2023. – Vol. 10 (9). – P. 095902. – DOI: 10.1088/2053-1591/acf6f8.

27. Room-temperature benzene sensing with Au-doped ZnO nanorods/exfoliated WSe<sub>2</sub> nanosheets and density functional theory simulations / D. Zhang, W. Pan, L. Zhou, S. Yu // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2021. – Vol. 13 (28). – P. 33392–33403. – DOI: 10.1021/acsami.1c03884.

28. Reversible exsolution of dopant improves the performance of Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for chemical looping hydrogen production / D. Hosseini, F. Donat, P.M. Abdala, S.M. Kim, A.M. Kierzkowska, C.R. Müller // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2019. – Vol. 11 (20). – P. 18276–18284. – DOI: 10.1021/acsami.8b16732.

29. Anodic shock-triggered exsolution of metal nanoparticles from perovskite oxide / W. Fan, B. Wang, R. Gao, G. Dimitrakopoulos, J. Wang, X. Xiao, L. Ma, K. Wu, B. Yildiz, J. Li // *Journal of the American*

*Chemical Society*. – 2022. – Vol. 144 (17). – P. 7657–7666. – DOI: 10.1021/jacs.1c12970.

30. Photovoltaic and impedance analysis of dye-sensitized solar cells with counter electrodes of manganese dioxide and silver-doped manganese dioxide / W. Shah, R.W. Khwaja, S.M. Faraz, Z.H. Awan, M.H. Sayyad // *Engineering Proceedings*. – 2023. – Vol. 46 (1). – P. 31. – DOI: 10.3390/engproc2023046031.

31. Printed carbon nanotubes-based flexible resistive humidity sensor / X. Zhang, D. Maddipatla, A.K. Bose, S. Hajian, B.B. Narakathu, J.D. Williams, M.F. Mitchell, M.Z. Atashbar // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 20 (21). – P. 12592–12601. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.3002951.

32. Novel copper oxide-integrated carbon paste tirofiban voltammetric sensor / M. Al-Bonayan, J.T. Althakafy, A.Q. Alorabi, N.A. Alamrani, E.H. Aljuhani, O. Alaysuy, S.D. Al-Qahtani, N.M. El-Metwaly // *ACS Omega*. – 2023. – Vol. 8 (5). – P. 5042–5049. – DOI: 10.1021/acsomega.2c07790.

33. Ultrafast responsive humidity sensor based on roasted gram derived carbon quantum dots: experimental and theoretical study / P. Chaudhary, D.K. Maurya, S. Yadav, A. Pandey, R.K. Tripathi, B.C. Yadav // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2021. – Vol. 329. – P. 129116. – DOI: 10.1016/j.snb.2020.129116.

34. Lee J., Cho D., Jeong Y. A resistive-type sensor based on flexible multi-walled carbon nanotubes and polyacrylic acid composite films // *Solid-State Electronics*. – 2013. – Vol. 87. – P. 80–84. – DOI: 10.1016/j.sse.2013.05.001.

35. Wearable humidity sensor based on porous graphene network for respiration monitoring / Y. Pang, J. Jian, T. Tu, Z. Yang, J. Ling, Y. Li, X. Wang, Y. Qiao, H. Tian, Y. Yang, T.-L. Ren // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2018. – Vol. 116. – P. 123–129. – DOI: 10.1016/j.bios.2018.05.038.

36. Kumar U., Yadav B.C. Development of humidity sensor using modified curved MWCNT based thin film with DFT calculations // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – Vol. 288. – P. 399–407. – DOI: 10.1016/j.snb.2019.03.016.

37. Fabrication and characterization of an ultrasensitive humidity sensor based on metal oxide/graphene hybrid nanocomposite / D. Zhang, H. Chang, P. Li, R. Liu, Q. Xue // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2016. – Vol. 225. – P. 233–240. – DOI: 10.1016/j.snb.2015.11.024.

38. Ultrahigh humidity sensitivity of graphene oxide / H. Bi, K. Yin, X. Xie, J. Ji, S. Wan, L. Sun, M. Terrones, M.S. Dresselhaus // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3 (1). – P. 2714. – DOI: 10.1038/srep02714.

39. Synthesis and characterizations of exohedral functionalized graphene oxide with iron nanoparticles

for humidity detection / K. Kumar, U. Kumar, M. Singh, B.C. Yadav // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2019. – Vol. 30 (14). – P. 13013–13023. – DOI: 10.1007/s10854-019-01663-9.

40. Enhanced performance of a CMOS interdigital capacitive humidity sensor by graphene oxide / C.-L. Zhao, M. Qin, W.-H. Li, Q.-A. Huang // 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. – IEEE, 2011. – P. 1954–1957. – DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969243.

41. Highly sensitive flexible humidity sensors with fast response and recovery times based on the composite

of graphene oxide and WS<sub>2</sub> for detection of human breath and fingertip proximity / G. Wang, Q. Gao, N. Ke, F. Si, J. Wang, J. Ding, W. Zhang, X. Fan // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2025. – Vol. 13 (10). – P. 4929–4937. – DOI: 10.1039/D4TC05303F.

42. Wearable CNTs-based humidity sensors with high sensitivity and flexibility for real-time multiple respiratory monitoring / H.-S. Kim, J.-H. Kang, J.-Y. Hwang, U.S. Shin // *Nano Convergence*. – 2022. – Vol. 9 (1). – P. 35. – DOI: 10.1186/s40580-022-00326-6.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Fabrication, characterization and performance evaluation of zinc oxide doped nanographite material as a humidity sensor

Farrukh Waheed<sup>1, a</sup>, Amtul Qayoom<sup>2, b</sup>, Muhammad Faizan Shirazi<sup>3, c, \*</sup>

<sup>1</sup> Department of Computer Science, Usman Institute of Technology University, ST-13, Abul Hasan Isphahani Road, Block 7, Gulshan-e-Iqbal, Karachi, 75300, Pakistan

<sup>2</sup> Department of Chemistry, NED University of Engineering and Technology, University Road, Karachi, 75270, Pakistan

<sup>3</sup> Department of Electronic Engineering, NED University of Engineering and Technology, University Road, Karachi, 75270, Pakistan

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0009-0004-6527-0965>,  [fwbaig@uitu.edu.pk](mailto:fwbaig@uitu.edu.pk); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0149-2177>,  [amtulq@neduet.edu.pk](mailto:amtulq@neduet.edu.pk);

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-4488-8860>,  [faizanshirazi@neduet.edu.pk](mailto:faizanshirazi@neduet.edu.pk)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 04 June 2025

Revised: 23 June 2025

Accepted: 10 July 2025

Available online: 15 September 2025

##### Keywords:

Humidity sensor

ZnO nanoparticles

Smart sensing Devices

Capacitance and impedance analysis

Fast response and recovery

Environmental and industrial monitoring

##### Funding

The work is carried out within the framework of the NEDUET PhD program.

#### ABSTRACT

**Introduction.** The growing demand for real-time environmental monitoring technologies has led to increased interest in high-performance humidity sensors with rapid response, high sensitivity, and long-term stability. Zinc oxide (ZnO) is a widely used semiconducting oxide material for such applications due to its chemical stability and sensitivity to humidity variations. However, its performance can be further enhanced through material engineering. This study investigates the doping of ZnO nanoparticles with nanographite material (NGM) to improve humidity-sensing characteristics. The **purpose of the work** is to develop ZnO–NGM nanocomposite-based capacitive humidity sensors with improved response/recovery time and sensitivity by modifying the electronic and surface properties of ZnO through NGM doping. **Research methods.** ZnO–NGM nanocomposites with varying NGM content (1 wt.%, 2 wt.%, 4 wt.%, 5 wt.%, and 10 wt.%) were synthesized via a chemical precipitation route. The optical behavior of pure ZnO was analyzed using UV–Vis spectroscopy, which revealed a sharp absorption edge at 367 nm, indicating a bandgap near 3.3 eV. Structural and morphological properties were examined using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), confirming NGM integration and enhanced surface porosity. The composite sensing films were deposited onto FTO-coated glass substrates using the ‘doctor blade’ method to fabricate the capacitive sensors. The sensing performance was evaluated in a nitrogen-controlled chamber over a relative humidity (RH) range of 10% to 95%, with capacitance measurements recorded across a frequency range of 10 kHz to 1 MHz. **Results and discussion.** Among all tested compositions, the 4 wt.% NGM-doped ZnO sensor demonstrated the best performance, with a rapid response time of 4.0 s, a recovery time of 6.2 s, and excellent sensitivity. These improvements are attributed to enhanced surface conductivity and more active adsorption-desorption kinetics due to NGM. The developed sensors show strong potential for integration in real-time environmental monitoring systems, industrial automation, and smart home humidity control applications. The incorporation of nanographite into ZnO matrices significantly enhances humidity-sensing capabilities. The ZnO–NGM composite, particularly at 4 wt.% doping, offers a promising pathway for the development of next-generation, high-efficiency humidity sensors.

**For citation:** Waheed F., Qayoom A., Shirazi M.F. Fabrication, characterization and performance evaluation of zinc oxide doped nanographite material as a humidity sensor. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 183–204. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.3-183-204. (In Russian).

#### References

1. Saqib M., Ali Khan S., Mutee Ur Rehman H.M., Yang Y., Kim S., Rehman M.M., Young Kim W. High-performance humidity sensor based on the graphene flower/zinc oxide composite. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11 (1), p. 242. DOI: 10.3390/nano11010242.
2. Yang H., Ye Q., Zeng R., Zhang J., Yue L., Xu M., Qiu Z.-J., Wu D. Stable and fast-response capacitive humidity sensors based on a ZnO nanopowder/PVP-RGO multilayer. *Sensors*, 2017, vol. 17 (10), p. 2415. DOI: 10.3390/s17102415.

#### \* Corresponding author

Shirazi Muhammad Faizan, Ph.D. (Engineering)

Department of Electronic Engineering,

NED University of Engineering and Technology,

75270, University Road, Karachi, Pakistan

Tel.: +92-21-99261261-8 ext. 2215, e-mail: [faizanshirazi@neduet.edu.pk](mailto:faizanshirazi@neduet.edu.pk)

3. Ullah Z., Mustafa G.M., Raza A., Khalil A., Awadh Bahajjaj A.A., Batool R., Sonil N.I., Ali I., Nazar M.F. Facile assembly of flexible humidity sensors based on nanostructured graphite/zinc oxide-coated cellulose fibrous frameworks for human healthcare. *RSC Advances*, 2024, vol. 14 (50), pp. 37570–37579. DOI: 10.1039/D4RA05761A.
4. Sun Y., Gao X., Shiwei A., Fang H., Lu M., Yao D., Lu C. Hydrophobic multifunctional flexible sensors with a rapid humidity response for long-term respiratory monitoring. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, vol. 11 (6), pp. 2375–2386. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c06162.
5. Ding S., Yin T., Zhang S., Yang D., Zhou H., Guo S., Li Q., Wang Y., Yang Y., Peng B., Yang R., Jiang Z. Fast-speed, highly sensitive, flexible humidity sensors based on a printable composite of carbon nanotubes and hydrophilic polymers. *Langmuir*, 2023, vol. 39 (4), pp. 1474–1481. DOI: 10.1021/acs.langmuir.2c02827.
6. Wu K., Miao X., Zhao H., Liu S., Fei T., Zhang T. Selective encapsulation of ionic liquids in UiO-66-NH<sub>2</sub> nanopores for enhanced humidity sensing. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, vol. 6 (10), pp. 9050–9058. DOI: 10.1021/acsanm.3c01727.
7. Lei D., Zhang Q., Liu N., Su T., Wang L., Ren Z., Zhang Z., Su J., Gao Y. Self-powered graphene oxide humidity sensor based on potentiometric humidity transduction mechanism. *Advanced Functional Materials*, 2022, vol. 32 (10), p. 2107330. DOI: 10.1002/adfm.202107330.
8. Adib M.R., Lee Y., Kondalkar V.V., Kim S., Lee K. A highly sensitive and stable rGO: MoS<sub>2</sub>-based chemiresistive humidity sensor directly insertable to transformer insulating oil analyzed by customized electronic sensor interface. *ACS Sensors*, 2021, vol. 6 (3), pp. 1012–1021. DOI: 10.1021/acssensors.0c02219.
9. Yu W., Chen D., Li J., Zhang Z. TiO<sub>2</sub>-SnS<sub>2</sub> nanoheterostructures for high-performance humidity sensor. *Crystals*, 2023, vol. 13 (3), p. 482. DOI: 10.3390/cryst13030482.
10. Baig M.F.W., Hasany S.F., Shirazi M.F. Green synthesis of nano graphite materials from lemon and orange peel: A sustainable approach for carbon-based materials. *Engineering Proceedings*, 2023, vol. 46 (1), p. 42. DOI: 10.3390/engproc2023046042.
11. Dare E., Adanu-Ogbole B., Oladoyinbo F., Makinde F., Uzosike A.O. Synthesis and characterization of silver–zinc oxide nanocomposites for humidity sensing. *Nano Select*, 2023, vol. 4 (4), pp. 255–262. DOI: 10.1002/nano.202200106.
12. Mahjoub M.A., Monier G., Robert-Goumet C., Réveret F., Echabaane M., Chaudanson D., Petit M., Bideux L., Gruzza B. Synthesis and study of stable and size-controlled ZnO–SiO<sub>2</sub> quantum dots: Application as a humidity sensor. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, vol. 120 (21), pp. 11652–11662. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b00135.
13. Qian L., Fang C., Gui Y., Tian K., Guo H., Guo D., Guo X., Liu P. Heterojunctions of ZnO-nanorod-decorated WO<sub>3</sub> nanosheets coated with ZIF-71 for humidity-independent NO<sub>2</sub> sensing. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, vol. 6 (14), pp. 13216–13226. DOI: 10.1021/acsanm.3c01955.
14. Ling T.Y., Pu S.H., Fishlock S.J., Han Y., Reynolds J.D., McBride J.W., Chong H.M.H. Sensing performance of nanocrystalline graphite-based humidity sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2019, vol. 19 (14), pp. 5421–5428. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2905719.
15. Wu J., Yin C., Zhou J., Li H., Liu Y., Shen Y., Garner S., Fu Y., Duan H. Ultrathin glass-based flexible, transparent, and ultrasensitive surface acoustic wave humidity sensor with ZnO nanowires and graphene quantum dots. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, vol. 12 (35), pp. 39817–39825. DOI: 10.1021/acsami.0c09962.
16. Dinç Zor Ş., Cankurtaran H. Impedimetric humidity sensor based on nanohybrid composite of conducting poly (diphenylamine sulfonic acid). *Journal of Sensors*, 2016, vol. 2016 (1), p. 5479092. DOI: 10.1155/2016/5479092.
17. Lin C., Zhang H., Zhang J., Chen C. Enhancement of the humidity sensing performance in Mg-doped hexagonal ZnO microspheres at room temperature. *Sensors*, 2019, vol. 19 (3), p. 519. DOI: 10.3390/s19030519.
18. Chaudhary P., Verma A., Chaudhary S., Kumar M., Lin M.-F., Huang Y.-C., Chen K.-L., Yadav B.C. Design of a humidity sensor for a PPE kit using a flexible paper substrate. *Langmuir*, 2024, vol. 40 (18), pp. 9602–9612. DOI: 10.1021/acs.langmuir.4c00366.
19. Agadi N.P., Teradal N.L., Manjunatha D.H., Seetharamappa J. Zinc oxide anchored porous reduced graphene oxide: Electrode material for sensing of ezetimibe. *Journal of The Electrochemical Society*, 2024, vol. 171 (3), p. 037513. DOI: 10.1149/1945-7111/ad2f78.
20. Hongsih N., Chansuriya S., Yatmontree B., Uai S. Capacitively coupled contactless conductivity detection (C4D) of ZnO nanostructures gas sensor by adding Au: Pd metal with response to ethanol and acetone vapor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2653 (1), p. 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/2653/1/012062.
21. Luo N., Cai H., Li X., Guo M., Wang C., Wang X., Hu P., Cheng Z., Xu J. Non-crystal-RuO<sub>x</sub>/crystalline-ZnO composites: controllable synthesis and high-performance toxic gas sensors. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, vol. 10 (28), pp. 15136–15145. DOI: 10.1039/D2TA02856E.





22. Saxena K., Kumar A., Chauhan N., Khanuja M., Malhotra B.D., Jain U. Electrochemical immunosensor for detection of *H. pylori* secretory protein VacA on g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/ZnO nanocomposite-modified Au electrode. *ACS Omega*, 2022, vol. 7 (36), pp. 32292–32301. DOI: 10.1021/acsomega.2c03627.
23. Dhahri R., Benamara M., Nassar K.I., Elkenany E.B., Al-Syadi A.M. Zinc oxide-based sensor prepared by modified sol–gel route for detection of low concentrations of ethanol, methanol, acetone, and formaldehyde. *Semiconductor Science and Technology*, 2024, vol. 39 (11), p. 115021. DOI: 10.1088/1361-6641/ad825e.
24. Hussain S., Hasany S., Ali S.U. Hematite decorated MWCNT nanohybrids: A facile synthesis. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 2022, vol. 44 (5), pp. 480–489. DOI: 10.52568/001121/JCSP/44.05.2022.
25. Doroftei C., Leontie L. Porous nanostructured gadolinium aluminate for high-sensitivity humidity sensors. *Materials*, 2021, vol. 14 (22), p. 7102. DOI: 10.3390/ma14227102.
26. Zhang H., Liu L., Huang C., Liang S., Jiang G. Enhanced acetone gas sensing performance of ZnO polyhedrons decorated with LaFeO<sub>3</sub> nanoparticles. *Materials Research Express*, 2023, vol. 10 (9), p. 095902. DOI: 10.1088/2053-1591/acf6f8.
27. Zhang D., Pan W., Zhou L., Yu S. Room-temperature benzene sensing with Au-doped ZnO nanorods/exfoliated WSe<sub>2</sub> nanosheets and density functional theory simulations. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, vol. 13 (28), pp. 33392–33403. DOI: 10.1021/acsami.1c03884.
28. Hosseini D., Donat F., Abdala P.M., Kim S.M., Kierzkowska A.M., Müller C.R. Reversible exsolution of dopant improves the performance of Ca<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for chemical looping hydrogen production. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, vol. 11 (20), pp. 18276–18284. DOI: 10.1021/acsami.8b16732.
29. Fan W., Wang B., Gao R., Dimitrakopoulos G., Wang J., Xiao X., Ma L., Wu K., Yildiz B., Li J. Anodic shock-triggered exsolution of metal nanoparticles from perovskite oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, vol. 144 (17), pp. 7657–7666. DOI: 10.1021/jacs.1c12970.
30. Shah W., Khwaja R.W., Faraz S.M., Awan Z.H., Sayyad M.H. Photovoltaic and impedance analysis of dye-sensitized solar cells with counter electrodes of manganese dioxide and silver-doped manganese dioxide. *Engineering Proceedings*, 2023, vol. 46 (1), p. 31. DOI: 10.3390/engproc2023046031.
31. Zhang X., Maddipatla D., Bose A.K., Hajian S., Narakathu B.B., Williams J.D., Mitchell M.F., Atashbar M.Z. Printed carbon nanotubes-based flexible resistive humidity sensor. *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 20 (21), pp. 12592–12601. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3002951.
32. Al-Bonayan A.M., Althakafy J.T., Alorabi A.Q., Alamrani N.A., Aljuhani E.H., Alaysuy O., Al-Qahtani S.D., El-Metwaly N.M. Novel copper oxide-integrated carbon paste titanium voltammetric sensor. *ACS Omega*, 2023, vol. 8 (5), pp. 5042–5049. DOI: 10.1021/acsomega.2c07790.
33. Chaudhary P., Maurya D.K., Yadav S., Pandey A., Tripathi R.K., Yadav B.C. Ultrafast responsive humidity sensor based on roasted gram derived carbon quantum dots: experimental and theoretical study. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, vol. 329, p. 129116. DOI: 10.1016/j.snb.2020.129116.
34. Lee J., Cho D., Jeong Y. A resistive-type sensor based on flexible multi-walled carbon nanotubes and polyacrylic acid composite films. *Solid-State Electronics*, 2013, vol. 87, pp. 80–84. DOI: 10.1016/j.sse.2013.05.001.
35. Pang Y., Jian J., Tu T., Yang Z., Ling J., Li Y., Wang X., Qiao Y., Tian H., Yang Y., Ren T.-L. Wearable humidity sensor based on porous graphene network for respiration monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*, 2018, vol. 116, pp. 123–129. DOI: 10.1016/j.bios.2018.05.038.
36. Kumar U., Yadav B.C. Development of humidity sensor using modified curved MWCNT based thin film with DFT calculations. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 288, pp. 399–407. DOI: 10.1016/j.snb.2019.03.016.
37. Zhang D., Chang H., Li P., Liu R., Xue Q. Fabrication and characterization of an ultrasensitive humidity sensor based on metal oxide/graphene hybrid nanocomposite. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, vol. 225, pp. 233–240. DOI: 10.1016/j.snb.2015.11.024.
38. Bi H., Yin K., Xie X., Ji J., Wan S., Sun L., Terrones M., Dresselhaus M.S. Ultrahigh humidity sensitivity of graphene oxide. *Scientific Reports*, 2013, vol. 3 (1), p. 2714. DOI: 10.1038/srep02714.
39. Kumar K., Kumar U., Singh M., Yadav B.C. Synthesis and characterizations of exohedral functionalized graphene oxide with iron nanoparticles for humidity detection. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, vol. 30 (14), pp. 13013–13023. DOI: 10.1007/s10854-019-01663-9.
40. Zhao C.-L., Qin M., Li W.-H., Huang Q.-A. Enhanced performance of a CMOS interdigital capacitive humidity sensor by graphene oxide. *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. IEEE*, 2011, pp. 1954–1957. DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969243.
41. Wang G., Gao Q., Ke N., Si F., Wang J., Ding J., Zhang W., Fan X. Highly sensitive flexible humidity sensors with fast response and recovery times based on the composite of graphene oxide and WS<sub>2</sub> for detection of human

breath and fingertip proximity. *Journal of Materials Chemistry C*, 2025, vol. 13 (10), pp. 4929–4937. DOI: 10.1039/D4TC05303F.

42. Kim H.-S., Kang J.-H., Hwang J.-Y., Shin U.S. Wearable CNTs-based humidity sensors with high sensitivity and flexibility for real-time multiple respiratory monitoring. *Nano Convergence*, 2022, vol. 9 (1), p. 35. DOI: 10.1186/s40580-022-00326-6.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).