

На правах рукописи



Ней Вин Аунг

**ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ НАНОПЛЕНКИ
ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОКСИДОМ МЕДИ УГЛЕРОДНЫХ
НАНОЧАСТИЦ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА**

Специальность 1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Научный руководитель: **Пугачевский Максим Александрович,**
доктор физико-математических наук, доцент,
директор регионального центра
нанотехнологий Юго-Западного
государственного университета

Официальные оппоненты: **Штарев Дмитрий Сергеевич,**
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор департамента ядерных технологий
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Дальневосточный федеральный
университет» (г. Владивосток)

Захвалинский Василий Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
лаборатории перспективных материалов и
технологий Федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования «Белгородский
государственный национальный
исследовательский университет (НИУ
«БелГУ»)» (г. Белгород)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС» (г. Москва)

Защита состоится «20» января 2026 г. в 16⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета 24.2.286.01, созданного на базе ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический университет», по адресу:
г. Воронеж, Московский просп. 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на
сайте <https://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан «20» ноября 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета  Стогней Олег Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

В последнее время большое внимание исследователей привлечено к разработке новых способов получения и исследования свойств композиционных наноструктур на основе углеродных материалов и оксидов переходных металлов. Это связано с возможностью получения на таких структурах особых материалов с уникальным сочетанием физико-химических свойств. Помимо того, что нанокompозиты на основе углеродных материалов обладают высокой стабильностью, хорошими электрофизическими свойствами, оптическим поглощением в широком спектральном диапазоне, они способны также демонстрировать люминесцентное свечение, избирательные электроемкостные характеристики и др. Наиболее интересными углеродными материалами в этом отношении являются углеродные нанотрубки, графен, фуллерены, углеродные кластеры, поэтому большое внимание уделяется разработке новых методов синтеза композиционных материалов на их основе.

Одним из перспективных способов получения композиционных наноструктур может служить метод электрофоретического синтеза, в котором под действием сил электрического поля происходит упорядочивание наноструктур вдоль линий напряженности внешнего силового поля. Синтезированные пленки могут иметь отличительные функциональные свойства. Так, например, композиционные нанопленки на основе углеродных наночастиц (CNP) с оксидами переходных металлов (Cu, Ti, Zn) могут обладать высоким коэффициентом поглощения в широком спектральном оптическом диапазоне, включая инфракрасный диапазон, что потенциально позволяет изготавливать из них сенсорные устройства. Среди оксидов переходных металлов, оксид меди (CuO) выделяется сочетанием высокого оптического поглощения, варьируемой шириной запрещенной зоны (1,5–2,1 эВ) и проводимостью р-типа, что позволяет изготавливать из него эффективные солнечные элементы и оптические датчики. Кроме того, композиционные нанопленки при прохождении электрических токов проводимости могут проявлять электрокаталитические свойства, благодаря чему они пригодны для использования в системах очистки воздушных и водных сред от органических загрязнений. Таким образом, получение и исследование композиционных электрофоретических наноструктур из углеродных наночастиц с оксидами меди (CNP/CuO) представляется весьма важной и актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Существующий уровень разработанности темы исследования.

Большинство существующих способов получения композиционных нанопленок основаны, как правило, на физических методах, к примеру ионно-лучевое напыление или лазерная абляция, которые характеризуются относительно низкой производительностью, высокими требованиями к техническому обслуживанию и др. В этой связи электрофоретический синтез позволяет создавать композиционные структуры на основе углеродных частиц, сохраняя уникальность их каталитических и физических свойств, при этом существенно превосходя аналоги по целому ряду характеристик, тем самым, решая актуальную проблему по созданию новых материалов, способных, в частности, служить в качестве эффективных катализаторов различных окислительных процессов.

Цель диссертационной работы

Целью работы является синтез электрофоретическим методом оригинальных композиционных нанопленок из углеродных наночастиц, модифицированных оксидом меди, а также изучение влияния размерных характеристик, структуры, химического и фазового состава синтезированных пленок на их электрофизические свойства.

Объект исследования – композиционные нанопленки CNPs/CuO

Предмет исследования – химический состав, морфология, структура, оптикоэлектрические и электрокаталитические свойства композиционных нанопленок CNPs/CuO, синтезированных электрофоретическим методом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику формирования однослойных и многослойных композиционных нанопленок CNPs/CuO электрофоретическим синтезом;
2. Провести гранулометрический анализ синтезированных композиционных нанопленок CNPs/CuO в зависимости от режимов получения;
3. Определить элементный, химический и фазовый анализ синтезированных нанопленок CNPs/CuO;
4. Исследовать оптические и сенсорные свойства синтезированных композиционных нанопленок CNPs/CuO в зависимости от спектрального (ультрафиолетового, видимого и инфракрасного) состава падающего излучения;
5. Изучить электрокаталитические свойства синтезированных композиционных нанопленок CNPs/CuO в реакции деградации молекулярных газов.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленной цели и решения обозначенных задач были применены методы: конфокальная микроскопия (КМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), сканирующая

электронные микроскопии (СЭМ), ИК-Фурье спектроскопия (ИКС), рентгенофазовый анализ (РФА), рамановская спектроскопия – комбинационное рассеяние света (КРС), электрофизические измерения на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Научная новизна работы:

1. Обнаружен размерный фотоэффект на резонансном поглощении при переотражении ИК излучения (1,06 мкм) на гетерогенных границах раздела фаз воздух/пленка/подложка, сопровождаемый ростом фото-ЭДС от 17 ± 2 мВ до 122 ± 2 мВ при изменении толщины пленок от 200 ± 10 нм до 2000 ± 100 нм.

2. Доказано, что высокая скорость деградации молекулярных газов изопропилового спирта и бутилацетата на поверхности композиционных нанопленок CNPs/CuO обусловлена механизмом электрокаталитического разложения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Электрофоретическое осаждение из углеродных коллоидных систем, предварительно центрифугированных при относительном ускорении $70 \times g$, $1700 \times g$, $6700 \times g$ и $12000 \times g$, приводит к формированию нанопленок из углеродных наночастиц со средними размерами 65 нм, 55 нм, 32 нм и 23 нм, соответственно.

2. Механизм электролитического осаждения обуславливает модификацию поверхности углеродных наночастиц оксидом меди (II) при формировании композиционных наноструктур CNPs/CuO электрофоретическим методом.

3. Теоретическая модель электропроводности, построенная в рамках приближения эффективной среды для двухфазной системы, состоящей из нанокомпозитной пленки CNPs/CuO и водного растворителя, адекватно описывает электрофизические процессы, протекающие в нанокомпозитных пленках при электрофоретическом синтезе.

4. Синтезированные многослойные композиционные нанопленки CNPs/CuO обладают электрооптическими сенсорными свойствами в широком (200–1100 нм) спектральном диапазоне с установленной фоточувствительностью: в ультрафиолетовом (200–400 нм) – до $40 \text{ мВ/Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; в видимом (400–800 нм) – до $130 \text{ мВ/Вт} \cdot \text{см}^{-2}$; в инфракрасном спектре (800–1100 нм) – до $200 \text{ мВ/Вт} \cdot \text{см}^{-2}$.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Построена электрофизическая модель проводимости электрофоретических пленок в рамках приближения эффективной

гомогенизированной среды, адекватно описывающая электрофизические процессы при электрофоретическом синтезе.

2. Получены электрофоретические многослойные композиционные нанопленки CNPs/CuO с сенсорными свойствами в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах. Получен патент на изобретение.

3. На основе композиционных нанопленок CNPs/CuO изготовлены пористые структуры с высокой электрокаталитической активностью в реакциях деградации органических молекулярных газовых систем.

4. Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при изучении дисциплин «Физика конденсированного состояния», «Физика наносистем», «Материаловедение наноструктурных материалов» и рекомендованы к внедрению в профильные специальности магистерской и аспирантской подготовки.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов работы обеспечена проведением комплексных исследований композиционных наноструктур современными взаимодополняющими наноинструментальными методами (СЭМ, РФА, КРС, ИК), воспроизводимостью результатов, а также согласованностью экспериментальных результатов с теоретическими расчетами и литературными данными.

Апробация и внедрение результатов работы:

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях: X Всероссийской научно-практической конференции «Нанотехнологии: образование, наука, инновации», Курск, 2019; Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2020; «Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование: Материалы XVI региональной научной конференции», Хабаровск, 2020; II Международная молодежная конференция «Современные материалы и технологии», Саратов, 2021; 15th International Conference Gas Discharge Plasmas and Their Applications, Екатеринбург, 2021; VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, Москва, 2022; The Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, Владивосток, 2022; Сборник научных статей 2-й Международной конференции . «Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства НТ-03», Курск, 2022. V Международная научно-техническая конференция «Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития», Волгоград, 2025; 6-й международной конференции по биомедицинским материалам ICBM-2025, Гуйлинь, Китай, 2025.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Автор проводил функционализацию растворов углеродных наночастиц, разрабатывал методику синтеза и получал экспериментальные образцы электрофоретическим методом. Автор участвовал в проведении экспериментальных исследований, обсуждении, анализе и интерпретации полученных данных, а также принимал участие в подготовке статей к публикации.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 17 печатных работ, в том числе – 7 статей в рецензируемых научных журналах (3 – WOS&Scopus, 4 – Перечень ВАК), 1 – патент, 9 – материалов и тезисов конференций.

Соответствие паспорту научной специальности Содержание, направленность диссертационной работы и её основные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, а именно: по п 5. «Разработка технологии и оборудования для получения наноструктурных металлических, диэлектрических, керамических, композиционных (на основе металлической, диэлектрической, минеральной и полимерной матриц) материалов, в том числе, с наноструктурами поверхностными функциональными слоями и покрытиями, обладающих широким спектром функциональных свойств»; п 6. «Установление закономерностей влияния технологии получения и обработки материалов на их структуру, механические, химические и физические свойства, а также технологические свойства изделий, предназначенных для использования в различных областях промышленности и медицины».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из списка сокращений и обозначений, введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 145 страницы, содержит 70 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы включает 159 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и определены задачи исследования, отражена степень разработанности темы диссертации, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы на научных конференциях и в публикациях по теме диссертации.

Первая глава посвящена анализу научных трудов отечественных и зарубежных исследователей в области темы диссертационного исследования. Проведен анализ особенностей строения и физико-химических свойств

углеродных наноматериалов. Указано, что специфическая электронная структура и нанометровый размер данных материалов обусловлены способностью атома углерода к образованию различных типов гибридизации орбиталей (sp , sp^2 , sp^3), что приводит к формированию разнообразных аллотропных форм. Отдельно рассмотрены структура и свойства одностенных углеродных нанотрубок (CNTs) и углеродных наночастиц (CNPs). Подчеркивается, что как оксид меди (CuO), так и углеродные наноматериалы проявляют выраженные оптические и электрические свойства. Для оксида меди, являющегося полупроводником р-типа, характерна узкая ширина запрещенной зоны. Детально проанализированы оптические свойства наночастиц CuO . Показано, что формирование нанокомпозитов на основе углеродных носителей и оксида меди позволяет создать систему с комбинированной шириной запрещенной зоны. Сочетание полупроводников с разной шириной запрещенной зоны способствует расширению спектра поглощения в видимой области, что объясняет перспективность применения нанокомпозитов CNPs/ CuO в качестве чувствительных элементов оптических сенсоров. Проанализированы различные методы синтеза нанокомпозитов на основе углеродных материалов. Установлено, что наиболее перспективным с точки зрения контроля морфологии и состава является метод электрофоретического осаждения. Также отмечено, что композиционные наноструктуры на основе углеродных частиц с покрытием из оксида меди благодаря синергетическому эффекту их уникальных физико-химических свойств представляют значительный интерес для разработки оптических датчиков широкого спектрального диапазона.

Вторая глава содержит методику получения композиционных нанопленок CNPs/ CuO с контролируемой удельной поверхностью и размером частиц (рисунок 1). В исследовании использовался углеродный материал TUBALL (производство OCSiAl, Россия) на основе водного раствора углеродных наночастиц с различным аспектным отношением.

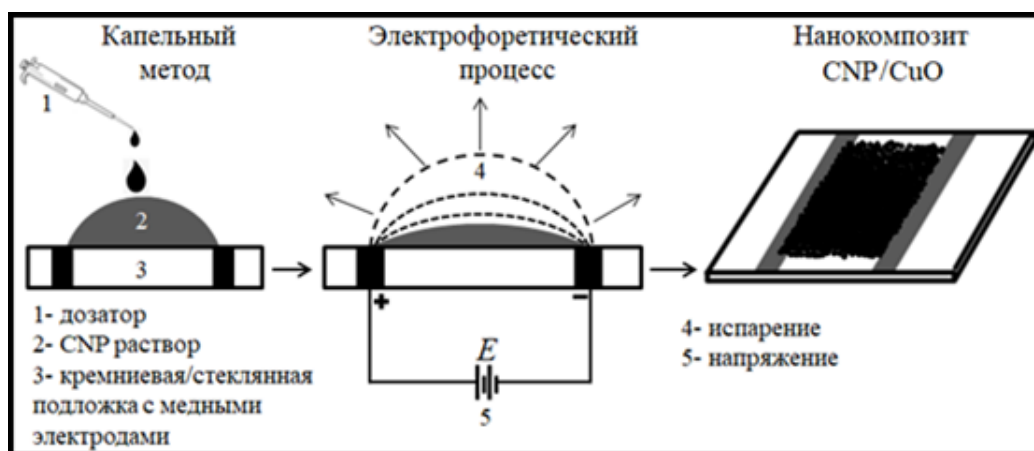


Рисунок 1 – Схематическое изображение электрофоретического синтеза композиционных нанопленок CNPs/ CuO из коллоидной углеродной системы с медными электродами

Получение композиционных нанопленок происходило в два этапа: 1) приготовление коллоидной системы углеродных наночастиц, посредством ультразвукового диспергирования и последующего центрифугирования; 2) формирование композиционных нанопленок из углеродных систем с помощью электрофоретического синтеза.

Было установлено, что второй этап сопровождается одновременным протеканием параллельных процессов: во-первых, под действием электрофоретических сил формировалась нанопленка из углеродных наночастиц; во-вторых, поверхность углеродных наночастиц за счет возникающих электролитических процессов модифицировалась элементами с электродного материала.

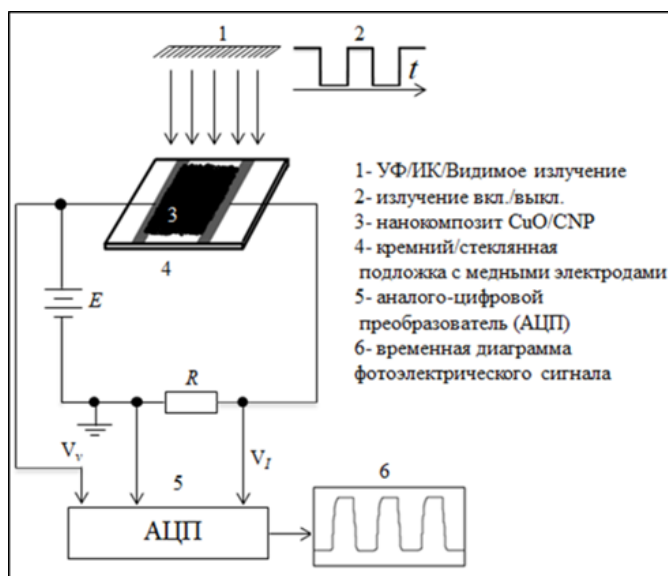


Рисунок 2 – Блок-схема-установки изучения сенсорных свойств композиционных наноструктур CNPs/CuO при облучении УФ/ИК/видимым диапазоном

Постоянное напряжение $10 \div 20$ В подавалось на электроды от программируемого стабилизированного источника питания АКТАКОМ АТН-1351 (300 В/0.4 А). Сенсорные свойства композиционных наноструктур CNPs/CuO исследовались при облучении УФ/ИК/видимым диапазоном излучения. Для этого была разработана специальная методика и установка (рисунок 2) для измерений.

Синтезированные композиционные нанопленки облучали ультрафиолетовым, инфракрасным и видимым излучением с экспозицией до

3 мин. Получаемые значения регистрировались с помощью аналого-цифрового преобразователя и записывались в компьютер.

Для исследования процессов разложения молекулярных газов, таких как изопропиловый спирт и бутилацетат, была изготовлена специальная установка (рисунок 3), представляющая собой замкнутую воздушную систему, содержащую вентилятор, воздушный фильтр на основе синтезированных композиционных нанопленок CNPs/CuO, дозированную подачу газа, газовый датчик AGS02MA (ASAIR/ TVOC промышленный датчик газа с модулем MEMS), сопряженный через плату Ардуино с ПК.

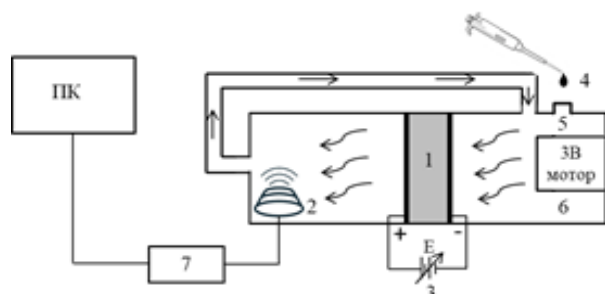
Изопропиловый спирт или бутилацетат в форме капли помещались в сосуд с выдержкой в 60 мин до полного испарения капли, образующиеся пары под действием вентилятора направлялись через воздушный фильтр с и без композиционного покрытия. С помощью датчика качества воздуха

регистрировали деградацию молекул газа при включении и выключении напряжения (0В, 9В, 17В) и результаты отображались на экране монитора компьютера. Деградацию молекулярных газов на воздушном фильтре из синтезированных композиционных пленок CNPs/CuO исследовали также с помощью ИК-Фурье спектрометра с газовой ячейкой.

Характеризация композиционных нанопленок CNPs/CuO производилась с помощью аналитического инструментария: спектроскопия комбинационного рассеивания, рентгеновский порошковый дифрактометр, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, атомно-силовую микроскопию, сканирующую электронную микроскопию и спектрофотометр.

Третья глава содержит собственные результаты исследований гранулометрии, морфологии, фазового и химического состава углеродных наноматериалов и композиционных наноструктур C/CuO.

Коллоидный углеродный раствор наносился методом капли между медными электродами. После нанесения капли коллоидного раствора на подложку она имела следующие размеры: высота - $h_k = 500$ мкм, диаметр -



1. Воздушный фильтр с композиционным покрытием
2. Газовый датчик
3. Источник ЭДС
4. Изопропиловый спирт или бутилацетат
5. Отверстие с крышкой
6. Вентилятор с расходомером
7. Модуль АЦП сопряженный с ардуино

Рисунок 3 – Блок-схема установки для исследования деградации молекулярных газов при прохождении через воздушный фильтр композиционных нанопленок

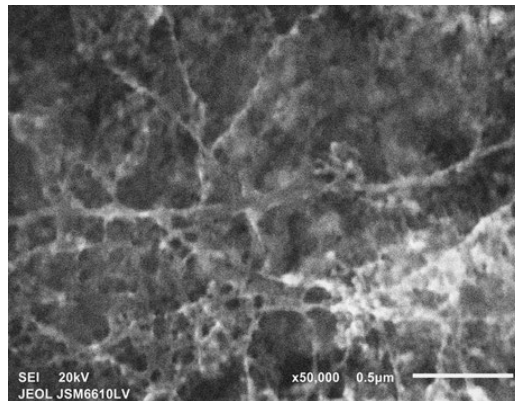
нанотрубок. Данные структуры, упорядочиваясь вдоль силовых линий электрического поля, образовывали цепочки из последовательно соединенных участков длиной от 100 до 800 мкм.

Согласно результатам энергодисперсионного анализа установлено, что синтезированные электрофоретические структуры, формирующиеся на подложке, равномерно покрываются медью из электродного материала за счет протекающего электролитического процесса. Анализ полученных АСМ-изображений (рисунок 5) позволяет сделать вывод о том, что с увеличением скорости центрифугирования коллоидного раствора из углеродных наночастиц размер частиц в составе синтезированных композиционных структур уменьшается. Так обнаружено, что средний размер частиц в нанопленках варьируется в зависимости от относительного ускорения

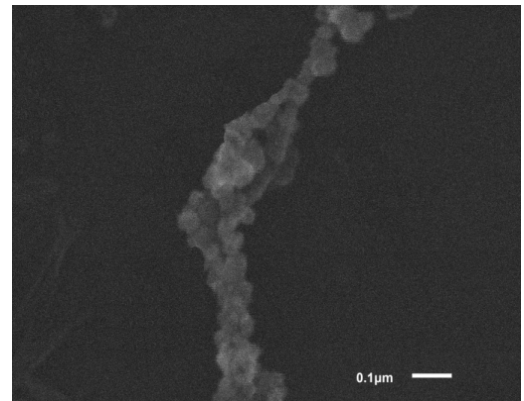
$d_k = 1000$ мкм. Изображения сканирующей электронной микроскопии линейных углеродных структур, сформированных из исходных нецентрифугированных растворов, представлены на рисунке 4 (а, б).

Анализ СЭМ-изображений позволяет выявить утолщение структур, которое объясняется формированием дополнительного слоя углеродных наночастиц (размером от 40 до 80 нм) по поверхности углеродных

центрифугирования исходных растворов: для ускорения $70\times g$ средний размер частиц составляет 65 нм; $1700\times g$ – 55 нм, $6700\times g$ – 34 нм, $12000\times g$ – 23 нм.

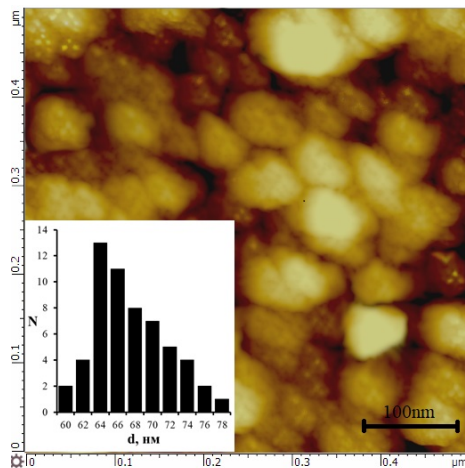


а)

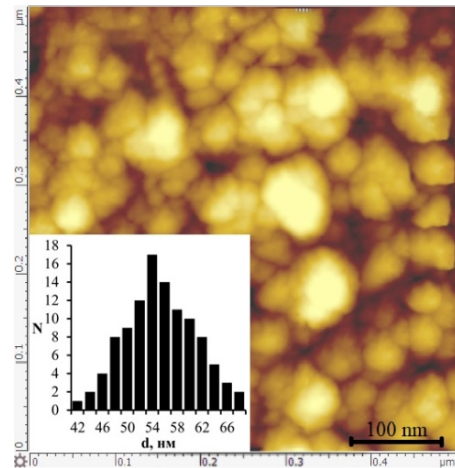


б)

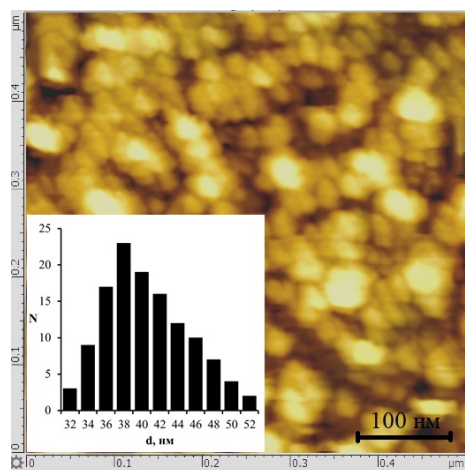
Рисунок 4 – СЭМ-изображение линейных углеродных структур, сформированных из исходных нецентрифугированных растворов при увеличении $50000\times$ (а) и $100000\times$ (б)



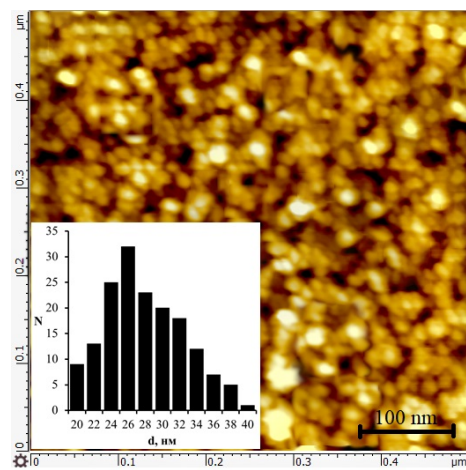
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – АСМ-изображения и распределение размеров частиц нанокompозитных структур CuO/CNP, синтезированных из исходных коллоидных систем, центрифугированных при $70\times g$ (60-78 нм) (а), $1700\times g$ (42-66 нм) (б), $6700\times g$ (32-52 нм) (в) и $12000\times g$ (20-40 нм) (г)

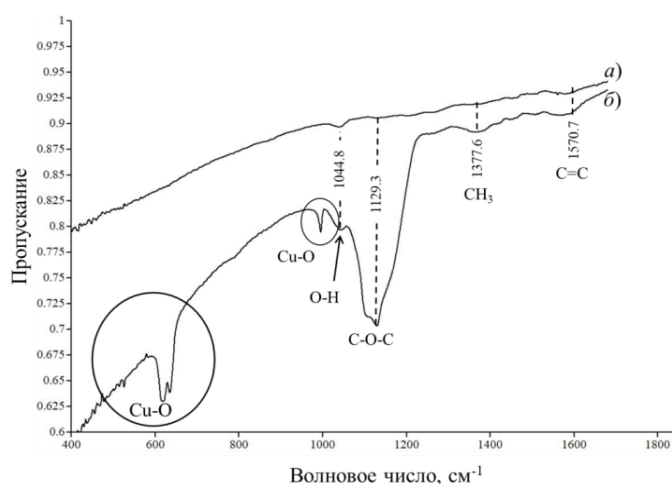


Рисунок 6 – Данные ИК-Фурье спектрометрии исходных углеродных частиц (а) и нанокomпозиционных нанопленок CNPs/CuO (б)

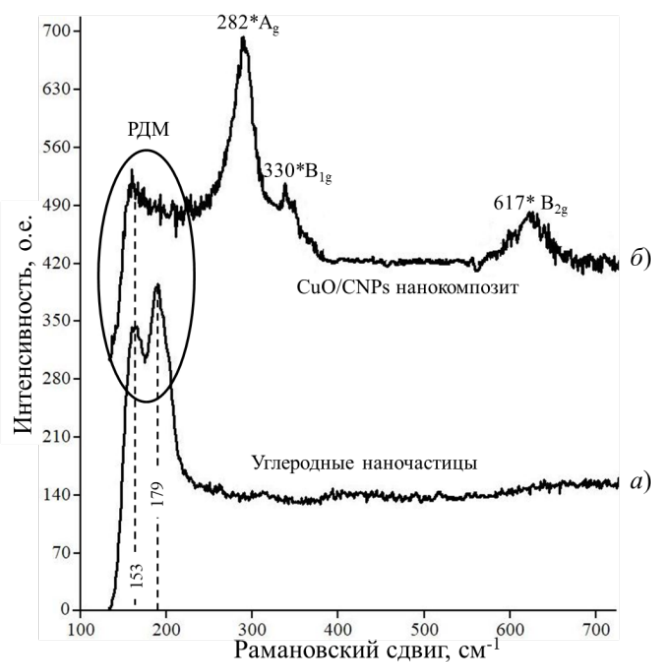


Рисунок 7 – Рамановская спектроскопия низкоэнергетической области частот исходных углеродных частиц (а) и нанокomпозиционных

углерода в их структуре.

По данным рамановской спектроскопии (рисунок 7, а) в области 153 и 179 см^{-1} проявились пики радиальной моды углеродных наночастиц ($\omega_{\text{РДМ}}$) (области низкоэнергетических частот). Частоты радиальных дыхательных мод можно определить в полупроводниковой области при энергии лазерного возбуждения 2,3 эВ. Колебательные спектры наноструктур CuO проявлялись

На рисунке 6 представлены результаты ИК-Фурье спектроскопии исходных углеродных частиц, а также нанокomпозиционных нанопленок CNPs/CuO. В спектре углеродных систем идентифицированы следующие характеристические полосы поглощения: 1570,7 см^{-1} — валентные колебания связи C=C, относящиеся к sp^2 -гибридизированному углероду в графитоподобных доменах; 1377,6 см^{-1} — симметричная деформационная вибрация связи C-H в группе CH_3 ; 1129,3 см^{-1} — валентные колебания связи C-O-C; 1044,8 см^{-1} — плоскостные деформационные колебания связи O-H. После проведения электрофоретического синтеза в спектре композиционных нанопленок CNPs/CuO наблюдаются новые полосы поглощения: 617,6 см^{-1} и 1011 см^{-1} , которые соответствуют валентным колебаниям связи Cu-O, что свидетельствует о модификации поверхности углеродных наночастиц оксидом меди. Наличие интенсивных полос при 1570,7 см^{-1} (C=C) и 1044,8 см^{-1} (C-O-C) в спектре углеродных наночастиц (CNPs) свидетельствует о преобладании sp^2 -гибридизации атомов

при 282 см^{-1} (мода A_g), 330 см^{-1} (мода B_g). Низкоэнергетическая область частот композиционных наноструктур CNPs/CuO показана на рисунке 7,б.

Таким образом, по результатам ИК-Фурье спектроскопии и рамановской спектроскопии установлено, что в процессе электрофоретического синтеза поверхность углеродных наночастиц модифицируется оксидом меди.

Четвёртая глава посвящена исследованию физико-химических свойств электрофоретических композиционных нанопленок CNPs/CuO. Измерение временных характеристик электрического тока при электрофоретическом структурировании композиционных нанопленок, осуществлялись с помощью цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS, сопряженного с персональным компьютером (рисунок 8).

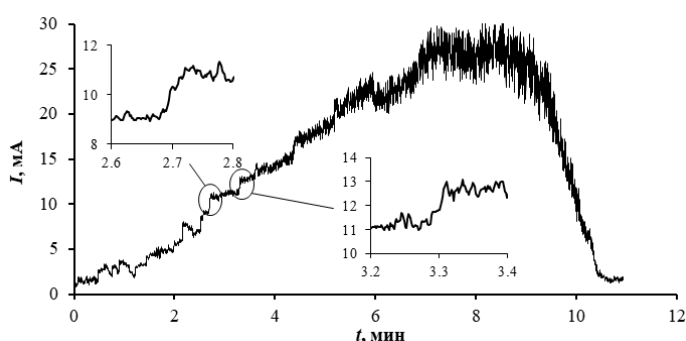


Рисунок 8 – Временные характеристики тока при электрофоретическом синтезе композиционных нанопленок

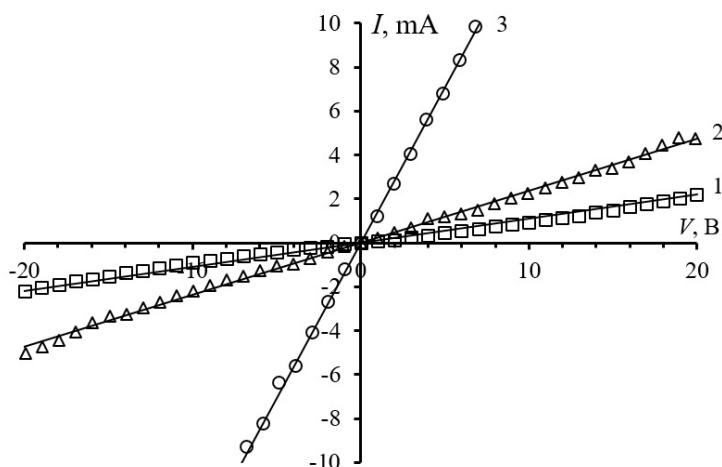


Рисунок 9 – Вольт-амперные характеристики композиционных нанопленок CNPs/CuO с толщиной 200 ± 10 нм (1), 400 ± 20 нм (2), 2000 ± 200 нм (3).

Сплошные линии – расчетные данные

среды растворителя и композиционных нанопленок CNPs/CuO, $\mathbf{R}_0$ и $\mathbf{R}_1$ – тензоры электрического рассеяния среды растворителя и композиционных нанопленок CNPs/CuO, соответственно. Расчет ступенчатых изменений на временных токовых диаграммах показал, что продольная удельная электрическая проводимость отдельных структур CNPs/CuO в зависимости

Ступенчатые

изменения на временных диаграммах электрического тока свидетельствуют о формировании проводящих углеродных структур в коллоидном растворе между медными электродами под действием

электрофоретических сил.

Для характеристики электрических свойств самих углеродных наночастиц может быть поставлена задача в рамках приближения эффективной гомогенизированной среды для двухфазной системы, состоящей из CNPs/CuO и водного растворителя. В этом случае определим следующее выражение:

$$\mathbf{R}_e = c_0 \mathbf{R}_0 + c_1 \mathbf{R}_1 \quad (1)$$

где $\mathbf{R}_e$ – тензор электрического рассеяния эффективной среды, c_0 и c_1 – объемные концентрации

от их толщины находится в пределах от 10^5 до 10^6 См·м⁻¹. Кроме того, используя полученные значения проводимости были рассчитаны вольтамперные характеристики композиционных нанопленок CNPs/CuO, которые имели хорошее согласие с экспериментальными данными (рисунок 9).

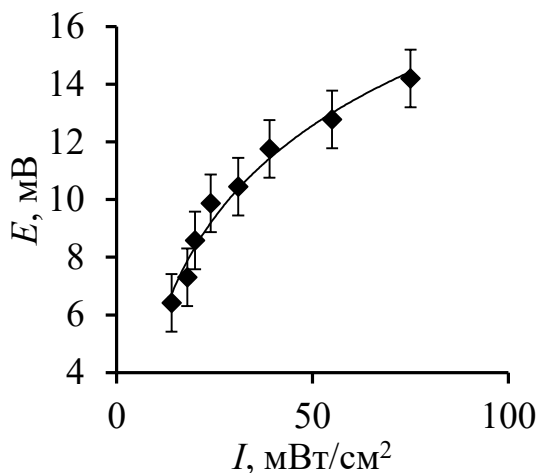


Рисунок 10 – Зависимость ЭДС композитных нанопленок CNPs/CuO от интенсивности ИК-излучения

Экспериментально установлено, что сенсорная чувствительность композиционных нанопленок CNPs/CuO, синтезированных электрофоретическим осаждением, существенно зависит от их морфологии и количества слоев. Пленки демонстрируют линейный рост фото-ЭДС с увеличением интенсивности оптического излучения в УФ-, видимом и ИК-диапазонах (рисунок 10).

Максимальная чувствительность синтезированных нанопленок в ультрафиолетовом (200-400 нм), видимом (400-800 нм) и инфракрасном (800-1100 нм) достигала значений до 40 мВ/Вт·см⁻², до 130 мВ/Вт·см⁻² и до 200 мВ/Вт·см⁻², соответственно.

Одним из факторов влияющим на фоточувствительность синтезированных нанопленок была скорость центрифугирования исходных углеродных систем, использованных для электрофоретического синтеза: низкие скорости (до 70×g) обеспечивали присутствие углеродных нанотрубок (частиц с высоким аспектным отношением) в составе композиционных пленок, формирующих проводящую сеть и повышающих их чувствительность. С другой стороны, увеличение количества слоев (до 10) приводило к росту общей толщины пленки (до 2000±100 нм), что сравнимо с длиной волны ИК-излучения и вызывало резонансное усиление поглощения света за счет многократного переотражения на гетерогенных границах раздела фаз воздух/пленка/подложка.

Рост фото-ЭДС в композиционных нанопленках объясняется фотогенерацией носителей заряда и их разделением на межфазных границах CNPs/CuO, где структурные дефекты действуют как ловушки, подавляющие рекомбинацию. Наибольшее значение ЭДС (122,5 мВ при 73 мВт/см²) зафиксировано для десятислойной структуры, что подтверждает перспективность таких систем для создания ИК-сенсоров.

При исследовании электрокаталитических свойств наноконпозиционных пленок молекулярные газы (изопропиловый спирт (CH₃)₂CHOH и бутилацетат CH₃COO(C₄H₉)), пропускали через воздушный фильтр с нанесенным покрытием из композиционных нанопленок CNPs/CuO,

в замкнутой системе с регулируемым затвором. Деградация молекул газов исследовались в условиях: 1) воздушный фильтр без композиционных пленок CNPs/CuO, 2) воздушный фильтр с композиционными нанопленками – 0 В, 3) 9 В и 4) 17 В, регистрацию полученных результатов осуществляли с использованием датчика качества воздуха.

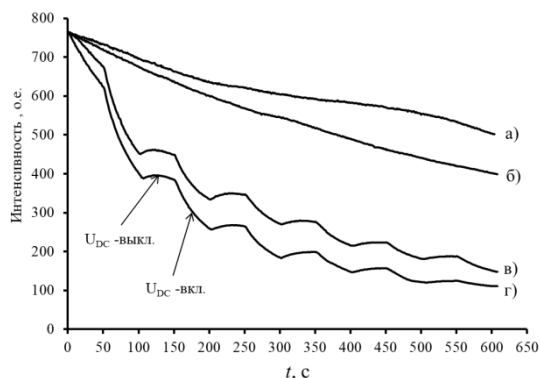


Рисунок 11 – Кинетика деградации молекул газа (бутилацетата) на воздушном фильтре без композиционных пленок CNPs/CuO (а), с композиционными нанопленками CNPs/CuO – 0 В (б), 9 В (в) и 17 В (г)

порядок быстрее (рисунок 10, б). На рисунке 11 (в, г) показаны результаты деградации молекул бутилацетата при включении/выключении постоянного напряжения. Аналогичные результаты были получены и в случае разложения изопропилового спирта. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о высокой электрокаталитической активности синтезированных композиционных пленок CNPs/CuO в процессе деградации молекулярных газов типа изопропилового спирта и бутилацетата.

На рисунке 12 представлены результаты деградации молекул бутилацетата (газа) при приложенном различном напряжении на композиционных пленках CNPs/CuO с помощью ИК-Фурье-спектрометра.

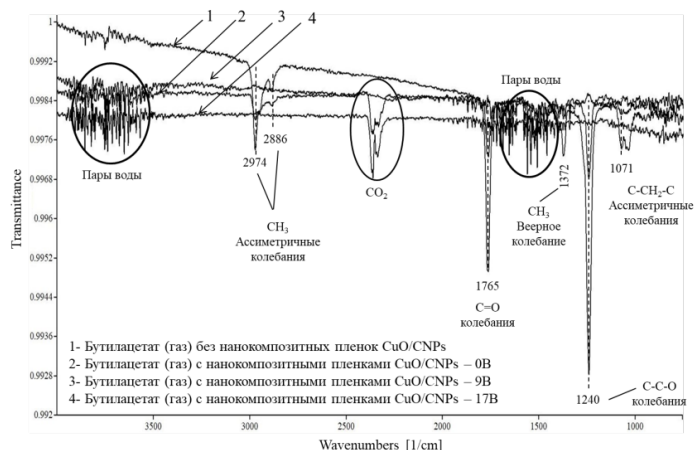


Рисунок 12 – ИК-Фурье результаты деградации молекул газа (бутилацетата) на воздушном фильтре без и с композиционными нанопленками CNPs/CuO (0 В, 9 В, 17 В)

На рисунке 11 представлена кинетика деградации молекул газа (бутилацетата) на воздушном фильтре. Из рисунка видно, что без композиционного покрытия (а) наблюдается медленно снижение концентрации газа с течением времени, вызванное либо поглощением воздушным фильтром, либо осаждением молекул на стенках сосудов. При нанесении композиционных пленок концентрация молекул газа в замкнутой системе снижалась на

Бутилацетат (газ) исследовали в сравнении на воздушном фильтре без и с композиционными нанопленками CNPs/CuO и при различных напряжениях (линия № 1 на рисунке 11), в котором функциональная группа $\text{CH}_3\text{COO}(\text{C}_4\text{H}_9)$ обнаруживается: при 2974 см^{-1} и 2886 см^{-1} – ассиметричные колебания CH_3 , 1765 см^{-1} – колебания $\text{C}=\text{O}$, 1372 см^{-1} – верное колебание CH_3 , 1240 см^{-1} – колебания $\text{C}-\text{C}-\text{O}$ и

1071 см^{-1} – ассиметричные колебания $\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}$. Результаты, полученные при пропускании через воздушный фильтр с композиционными нанопленками (0 В) показаны на кривой № 2 рисунка 12, в которой интенсивность функциональных групп $\text{CH}_3\text{COO}(\text{C}_4\text{H}_9)$ уменьшилась. Линии № 3 и № 4 рисунка 12 получены с композиционными нанопленками при напряжении 9В и 17В, соответственно. Молекулы газа $\text{CH}_3\text{COO}(\text{C}_4\text{H}_9)$ разлагались на пары воды (4000 – 3500 см^{-1} , 2000-1400 см^{-1}) и CO_2 (дублет при 2358 см^{-1} и 2345 см^{-1}) за счет протекания электрокаталитических процессов на композиционных пленках CNPs/CuO.

Согласно результатам ИК-Фурье спектроскопии, прохождение высокомолекулярных газов, таких как изопропиловый спирт $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ и бутилацетат $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$, сквозь воздушный фильтр с композиционными пленками CNPs/CuO с приложенным электрическим напряжением (9В, 17В), приводит к их полной деградации до CO_2 и H_2O за счет электрокаталитических процессов, протекающих на поверхности синтезированных пленок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных работ по синтезу и исследованию физико-химических свойств композиционных нанопленок CNPs/CuO сформулированы следующие выводы:

1. Согласно морфологическому и гранулометрическому анализу установлено, что изменение скорости центрифугирования углеродных коллоидных растворов приводит к формированию водных систем, обогащенных либо углеродными нанотрубками, либо наночастицами. С увеличением относительного ускорения (с $70\times g$ до $12000\times g$) центрифугирования растворов размер углеродных структур в них уменьшается (с 65 нм до 23 нм).

2. Электрофоретический синтез в центрифугированных углеродных коллоидных растворах приводит к формированию композиционных нанопленок из углеродных наночастиц, модифицированных CuO. Модификация поверхности углеродных наночастиц оксидом меди (II) обусловлена механизмом электролитического осаждения окисленных ионов меди.

3. В рамках приближения эффективной гомогенизированной среды для двухфазной системы, состоящей из композиционных нанопленок CNPs/CuO и водного растворителя построена теоретическая модель электропроводности, адекватно описывающая электрофизические процессы, протекающие в композиционных нанопленках CNPs/CuO при электрофоретическом синтезе.

4. По данным фотоэлектрических измерений установлено, что синтезированные композиционные нанопленки CNPs/CuO обладают хорошими сенсорными свойствами. При УФ облучении с ростом интенсивности освещения от 3,5 до 18 мВт см^{-2} электродвижущая сила (ЭДС)

на пятислойной пленке возрастает от $0,35 \pm 0,02$ до $1 \pm 0,02$ мВ; при облучении белым светом с ростом интенсивности освещения от 1,5 до 8,3 мВт см⁻² электродвижущая сила (ЭДС) возрастает от $0,57 \pm 0,02$ до $2,3 \pm 0,02$ мВ; при ИК-облучении с ростом интенсивности освещения от 14 до 75 мВт см⁻² возбуждаемая в однослойной нанопленке CNPs/CuO электродвижущая сила (ЭДС) E увеличивается с $6,4 \pm 2$ до 17 ± 2 мВ.

5. С ростом толщины пленок от 200 ± 10 нм до 2000 ± 100 нм при ИК-облучении с длиной волны 1,06 мкм и интенсивностью 75 мВт/см² происходит увеличение фото-ЭДС от 17 ± 2 мВ до 122 ± 2 мВ, обусловленное эффектом резонансного поглощения при переотражении ИК излучения на гетерогенных границах раздела фаз воздух/пленка/подложка.

6. Синтезированные многослойные композиционные нанопленки CNPs/CuO обладают фоточувствительностью до 40 мВ/Вт·см⁻² в ультрафиолетовом, до 130 мВ/Вт·см⁻² – в видимом, и до 200 мВ/Вт·см⁻² в инфракрасном диапазонах.

7. Согласно результатам ИК-Фурье спектроскопии, прохождение высокомолекулярных газов, таких как изопропиловый спирт (CH₃)₂CHOH и бутилацетат C₆H₁₂O₂, сквозь воздушный фильтр с композиционными пленками CNPs/CuO с приложенным электрическим напряжением (9В, 17В), приводит к их полному разложению на CO₂ и H₂O.

8. Механизм электрокаталитического разложения обуславливает высокую скорость деградации молекулярных газов изопропилового спирта и бутилацетата на поверхности композиционных нанопленок CNPs/CuO.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК по специальности диссертации:

1. **Ней Вин Аунг.** Электропроводность упорядоченных одностенных углеродных нанотрубок в постоянном электрическом поле / Ней Вин Аунг, Мьо Мин Тан, М.А. Пугачевский, В.В. Родионов, А.П. Кузьменко, Тет Пьо Наинг // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техники и технологии. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 86-98.

2. **Ней Вин Аунг.** Инфракрасные сенсорные свойства многослойных нанокompозитных пленок CuO/CNPs, полученных электрофоретическим синтезом / Ней Вин Аунг, М.А. Пугачевский, В.В. Филиппов, В.М. Емельянов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техники и технологии. – 2023. – Т. 13. – №. 2. – С. 177-188.

3. Рассеко Д.С. Исследование фотокаталитической активности оксида цинка в магнитном поле / Д.С. Рассеко, М.А. Пугачевский, **Ней Вин Аунг**, А.П. Кузьменко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техники и технологии. – 2022. – Т. 12. – №. 2. – С. 183-195.

4. **Ней Вин Аунг.** Деградация молекулярных газов на пористых композиционных наноструктурах CNPs/CuO / Ней Вин Аунг, М.А.

Пугачевский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техники и технологии. – 2025. – Т. 15. – №. 3. – С. 54-66.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus и Web of Science:

5. **Nay Win Aung**. Nanocomposite films of CNPs/CuO structures by electrophoresis method / Nay Win Aung, M.A. Pugachevskii, A.P. Kuzmenko, Myo Min Than // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – V. 2064. – №. 1. – P. 012105.

6. Пугачевский М. А. Получение аблированных частиц CeO_2 с нанодисперсным распределением по составу / М.А. Пугачевский, В.А. Мамонтов, **Ней Вин Аунг**, А.С. Чекаданов, А.П. Кузьменко // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 20. – С. 38-41.

In English translation: Pugachevskii M. A. Production of ablated CeO_2 particles with nanodispersed compositional distribution / M.A. Pugachevskii, V.A. Mamontov, **N.V. Aung**, A.S. Chekadanov, A.P. Kuzmenko // Technical Physics Letters. – 2020. – V. 46. – №. 10. – P. 1032-1035.

7. Kuzmenko A. P. Formation of hierarchical structures from functionalized multi-walled carbon nanotubes in aerosol containing solutions / A.P. Kuzmenko, Thet Phyto Naing, Myo Min Thant, **Nay Win Aung** // Modern Electronic Material. – 2020. – Vol.6. – №. 1. – P. 132-134.

Получен патент РФ на изобретение:

8. Пугачевский М.А. Способ получения многослойных нанокompозитных пленок CuO/C с сенсорными свойствами в широком спектральном оптическом диапазоне // Пугачевский М.А., **Ней Вин Аунг**. Патент России № 2810420. 2023. Бюл. №36.

В других изданиях:

9. **Ней Вин Аунг**. Формирование наночастиц CeO_2 методом лазерной абляции / Ней Вин Аунг, В.А. Мамонтов, М.А. Пугачевский // X Всероссийской научно-практической конференции «Нанотехнологии: образование, наука, инновации». – 2019. – С. 132-134.

10. Мамонтов В.А. Исследования антиокислительных свойств наночастиц оксидированного церия, полученных методом лазерной абляции / В.А. Мамонтов, **Ней Вин Аунг**, М.А. Пугачевский // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020». – 2020. – С. 72-73.

11. **Ней Вин Аунг**. Самоорганизация нанопленочных структур в коллоидной углеродной системе в стабилизированном электрическом поле / Ней Вин Аунг, В.А. Мамонтов, М.А. Пугачевский, Мьо Мин Тан // Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование: Материалы XVI региональной научной конференции. – Хабаровск. – 2020. – С. 103-105.

12. **Ней Вин Аунг**. Формирование нанокompозитных пленок CuO/CNPs при электро-форетическом процессе / Ней Вин Аунг, М.А. Пугачевский // II Международная молодежная конференция «Современные

материалы и технологии». – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. – 2021. – С. 148-151.

13. **Aung N.W.** Carbon nanoparticles (CNPs) coated copper oxide (CuO) by electrophoretic synthesis / N.W. Aung, V.A. Mamontov, M.M. Than, M.A. Pugachevskii, T.P. Naing // 15th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2021. – 2021. – P. 196.

14. **Аунг Н.В.** Сенсорные свойства нанокompозитных пленок CuO/C в видимом диапазоне / Н.В. Аунг, М.А. Пугачевский, А.П. Кузьменко // Viii Международная Конференция «Лазерные, плазменные Исследования И Технологии» Лаплаз-2022. – 2022. – P. 196.

15. **Aung N.W.** Studies on sensor properties of composite CuO/CNPs nanofilms obtained by electrophoretic synthesis / N.W. Aung, M.A. Pugachevskii, A.P. Kuzmenko // The Sixth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials Vladivostok, Russia. – 2022. P. 365-366.

16. **Ней Вин Аунг.** Сенсор влажности на основе нанокompозитных электрофоретических структур CuO/CNPs / Ней Вин Аунг, В.А. Мамонтов, Чжо Аунг Хеин // Сборник научных статей 2-й Международной конференции . «Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства НТ-03». – 2022. – P. 251-254.

17. **Ней Вин Аунг.** УФ фотоэлектрические свойства электрофоретических композитных нанопленок CuO/CNPs / Ней Вин Аунг, М.А. Пугачевский // V Международная Научно-техническая Конференция «Нанотехнологии и Наноматериалы: Современное Состояние и Перспективы Развития» . – 2025. – P. 15-16.

Подписано в печать «11» ноября 2025 г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная.

Печ. л. 1.1. Тираж 100 экз. Заказ 153.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Отпечатано в ЮЗГУ.