

ISSN 2091-5527

№ 2/2026

Ўзбекистон

Kompozitsion **M**ateriallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Ўзбекский научно-технический и производственный журнал

Композиционные материалы

5. Olimov L., Khojimatov I. Thermoelectric properties of silicon oxide //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 458. – С. 01022.
6. Olimov, L. (2025). Structural Models and Charge Transfer Processes of Granulated Nano Semiconductors.
7. Mamirov, A. M. (2021). Anvar o 'g 'li KS THERMOELECTRIC, RESISTANCE, PHOTO ELECTRIC DETECTORS AND ANALYSIS OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS IN THEM. *Web of Scientist: International Scientific Research Journal*, 2(12), 172-180.
8. Mamirov, A. M. (2022). Anvar o 'g 'li KS Production of micro-and nanoscale silicon granules using powder technology. *Texas Journal of Multidisciplinary Studies*, 5, 175-179.

УДК 544.526.5:544.723

СИНТЕЗ И ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА O-g-C₃N₅/ZnO

Сидрасулиева Г.Б., Айтмуратова А.Е., Муяссарова Р.И., Есиркепова В. К.,
Нурымбетова М.Т., Катгаев Н.Т., Акбаров Х.И.

Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, sidrasulievaguzal@gmail.com

Аннотация. Синтезирован нанокompозит O-g-C₃N₅/ZnO комбинированным методом кальцинации и гидротермальной обработки с использованием отработанного катализатора ГИАП-10. Подтверждено формирование гетероструктуры в композите. В реакции фотокаталитического разложения родамина С под действием солнечного света достигнута степень деградации более 97 % за 1,5 ч.

Ключевые слова: вторичное сырьё, нанокompозит g-C₃N₅/ZnO; фотокатализ, органические красители.

1. Введение. В настоящее время загрязнение водных ресурсов органическими соединениями антропогенного происхождения является одной из наиболее актуальных экологических проблем. Значительное количество органических красителей, поступающих со сточными водами текстильной, химической и других отраслей промышленности, отличается высокой токсичностью, устойчивостью к биodeградации и способностью к накоплению в окружающей среде [1, 2].

Традиционные методы очистки, такие как адсорбция, коагуляция, мембранное разделение и биологическая обработка, не всегда обеспечивают полное удаление стойких органических загрязнителей и могут сопровождаться образованием вторичных отходов [3]. В связи с этим всё большее внимание уделяется фотокаталитическим методам, позволяющим эффективно разлагать органические вещества под действием света за счёт образования активных форм кислорода [4].

Перспективным материалом для фотокатализа является графитоподобный нитрид углерода (g-C₃N₄), обладающий шириной запрещённой зоны около 2,7 эВ, что обеспечивает его активность в видимой области спектра, а также высокой термической и химической стабильностью [5]. Однако его эффективность ограничена высокой скоростью рекомбинации фотогенерированных носителей заряда.

Одним из эффективных способов повышения фотокаталитической активности является формирование гетероструктур с

оксидами металлов. В частности, оксид цинка (ZnO) характеризуется высокой фотосенсибилизацией, стабильностью и доступностью, а его комбинация с g-C₃N₄ способствует улучшению разделения зарядов и повышению каталитической активности [6].

Немаловажным направлением повышения экологической эффективности является использование вторичного промышленного сырья при синтезе функциональных материалов. В этом контексте отработанные катализаторы, такие как ГИАП-10, могут служить источником цинка для получения ZnO и создания фотокаталитических нанокompозитов.

Целью настоящей работы является синтез нанокompозита O-g-C₃N₅/ZnO на основе O-g-C₃N₅ и ZnO, полученного из отработанного ГИАП-10, а также исследование его структурных и фотокаталитических свойств при разложении родамина С.

2. Материалы и методы. 2.1. Исходные вещества. В качестве исходных реагентов использовали 3-амино-1,2,4-триазол, нитрат цинка (Zn(NO₃)₂·6H₂O), дистиллированную воду и другие реагенты аналитической чистоты. Нитрат цинка (Zn(NO₃)₂·6H₂O) был получен из отработанного промышленного катализатора ГИАП-10 [7].

2.2. Синтез O-g-C₃N₅. Кислород-допированный графитоподобный нитрид углерода (O-g-C₃N₅) синтезировали методом термической обработки 3-амино-1,2,4-триазола в присутствии кислорода воздуха. Для этого исходное вещество подвергали кальцинации при температуре 500 °С в течение 3 часов.

Полученный продукт использовали в качестве матрицы для последующего получения нанокomпозита (рис. 1.) [8].



Рис.1. Схема синтеза нанокomпозита $O-g-C_3N_5/ZnO$

2.3. Синтез нанокomпозита $O-g-C_3N_5/ZnO$.

Для получения нанокomпозита $O-g-C_3N_5/ZnO$ предварительно синтезированный $O-g-C_3N_5$ диспергировали в 50 мл дистиллированной воды и подвергали ультразвуковой обработке в течение 6 часов.

Затем в суспензию добавляли рассчитанное количество $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ и перемешивали в течение 30 минут до получения однородной смеси. Реакционную смесь переносили в тefлоновый автоклав объёмом 100 мл, герметично закрывали и выдерживали при температуре 180°C в течение 12 часов.

После завершения гидротермальной обработки продукт промывали дистиллированной водой, сушили при температуре 60°C в течение 24 часов и подвергали дополнительной калцинации на воздухе при температуре 350°C в течение 2 часов.

2.4. Методы исследования. Структурные и фазовые характеристики синтезированных образцов исследовали методами ИК-Фурье-спектроскопии и рентгенофазового анализа.

ИК-спектры регистрировали в диапазоне $400-4000\text{ см}^{-1}$. Фазовый состав и кристаллическую структуру определяли методом рентгенофазового анализа в диапазоне углов $2\theta = 10-80^{\circ}$.

2.5. Исследование фотокаталитической активности. Фотокаталитическую активность нанокomпозита оценивали по разложению родамина С (10 мг/л) под действием солнечного излучения.

Для эксперимента определённое количество фотокатализатора добавляли в раствор красителя и подвергали облучению. В процессе реакции отбирали пробы через заданные интервалы времени и анализировали изменение концентрации красителя спектрофотометрическим методом [9].

3. Результаты и обсуждение. Для установления структуры и оценки свойств синтезированного нанокomпозита $O-g-C_3N_5/ZnO$ применены методы ИК-Фурье-спектроскопии и рентгенофазового анализа.

Анализ ИК-спектра выявил характерные полосы, соответствующие структуре графитоподобного нитрида углерода (рис. 2). Широкая полоса в области $\sim 3139\text{ см}^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями групп $-NH_2$, $-NH$ и $-OH$, что свидетельствует о наличии остаточных аминогрупп и кислородсодержащих функциональных фрагментов, формирующихся в процессе синтеза в воздушной среде. Полосы в диапазоне $1607-1317\text{ см}^{-1}$ соответствуют колебаниям связей $C-N$ и $C=N$ в гетероциклической системе, а интенсивный пик при $\sim 806\text{ см}^{-1}$ указывает на наличие триазинового каркаса, характерного для полимерной структуры углеродного нитрида. Появление полосы в области $\sim 445\text{ см}^{-1}$ связано с колебаниями связей $Zn-O$, что подтверждает включение оксида цинка в структуру композита.

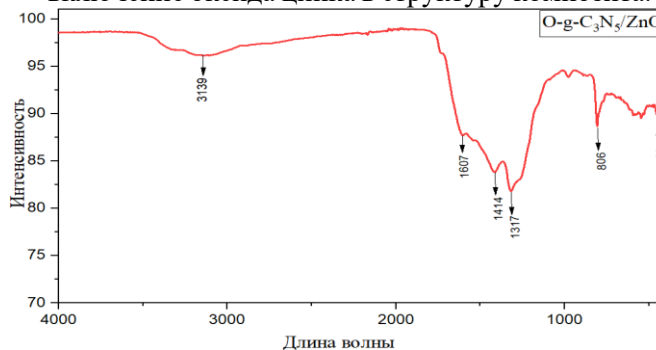


Рис.2. ИК-Фурье-спектр нанокomпозита $O-g-C_3N_5/ZnO$

Данные ИК-спектроскопии согласуются с результатами рентгенофазового анализа (рис. 3). На дифрактограмме наблюдаются характерные рефлексы $O-g-C_3N_5$ при $2\theta \approx 13,27^{\circ}$ и $27,17^{\circ}$, соответствующие плоскостям (100) и (002), что свидетельствует о сохранении слоистой структуры углеродного нитрида. Одновременно фиксируются интенсивные пики при $2\theta \approx 31,8^{\circ}$, $34,4^{\circ}$, $36,2^{\circ}$, $47,5^{\circ}$ и $56,6^{\circ}$, относящиеся к кристаллографическим плоскостям (100), (002), (101), (102) и (110) гексагональной фазы ZnO .

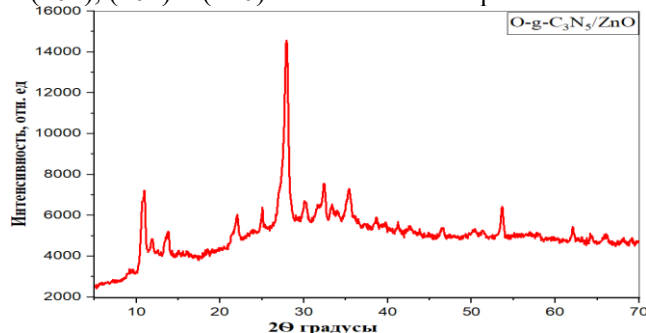
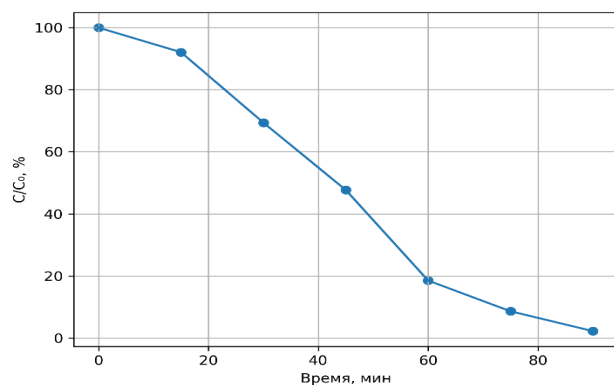


Рис.3. Дифрактограмма нанокomпозита $O-g-C_3N_5/ZnO$

Совместный анализ ИК- и XRD-данных подтверждает формирование двухфазного нанокompозита с выраженным межфазным взаимодействием. При этом отсутствие посторонних фаз указывает на высокую степень чистоты материала, а сохранение характеристических рефлексов обоих компонентов свидетельствует о формировании устойчивой гетероструктуры. Уширение дифракционных линий указывает на наноразмерный характер кристаллических доменов, что обеспечивает развитую межфазную поверхность.

Фотокаталитическая активность нанокompозита O-g-C₃N₅/ZnO была исследована в реакции разложения родамина С под действием солнечного излучения. Изменение



относительной концентрации красителя во времени представлено на рис. 4а.

Как показывают экспериментальные данные, процесс фотодегradации протекает интенсивно и характеризуется выраженной нелинейной зависимостью концентрации от времени. В начальной стадии (0–30 мин) наблюдается сравнительно медленное снижение концентрации (до ~30 %), что связано с установлением адсорбционно-десорбционного равновесия и активацией поверхности фотокатализатора. В интервале 30–60 минут происходит резкое ускорение процесса: концентрация родамина С уменьшается с 69,4 % до 18,5 %, что свидетельствует о максимальной активности фотокаталитической системы и интенсивной генерации активных форм кислорода.

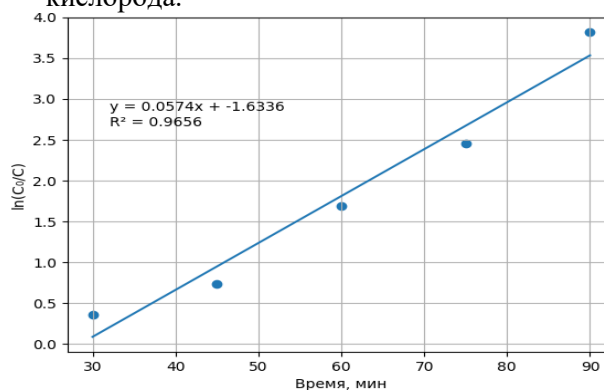


Рис.4. (а) Фотокалитическая деградация родамина С в присутствии нанокompозита O-g-C₃N₅/ZnO; (б) кинетический график псевдопервого порядка

На заключительной стадии (60–90 мин) скорость реакции снижается, что обусловлено уменьшением концентрации исходного вещества и накоплением промежуточных продуктов. При этом степень деградации достигает более 97 %, что указывает на высокую эффективность синтезированного нанокompозита.

Для количественной оценки кинетики процесса использована модель псевдопервого порядка. Линеаризованная зависимость $\ln(C_0/C)$ от времени представлена на рис. 4б. Расчёты проводились по линейному участку в интервале 30–90 минут, что позволило определить кинетические параметры процесса.

Установлено, что фотокаталитическое разложение родамина С подчиняется модели псевдопервого порядка с константой скорости $k \approx 0,057 \text{ мин}^{-1}$ и коэффициентом корреляции $R^2 \approx 0,97$, что свидетельствует о хорошем соответствии экспериментальных данных выбранной модели.

Высокая фотокаталитическая активность нанокompозита обусловлена формированием гетероперехода O-g-C₃N₅/ZnO, обеспечивающего эффективное разделение

фотогенерированных электронно-дырочных пар. При облучении электроны переходят в зону проводимости ZnO, тогда как дырки остаются в валентной зоне O-g-C₃N₅, что снижает вероятность рекомбинации.

В результате на поверхности фотокатализатора генерируются активные формы кислорода ($\bullet\text{OH}$ и $\text{O}_2\bullet^-$), которые участвуют в окислительном разрушении молекул красителя. Дополнительным фактором, повышающим эффективность процесса, является наноразмерная структура композита и развитая межфазная поверхность, обеспечивающие увеличение числа активных центров.

Дополнительным фактором, определяющим высокую фотокаталитическую активность, является наноразмерная структура композита, обеспечивающая развитую межфазную поверхность, увеличение числа активных центров и ускоренный перенос заряда. Использование вторичного сырья (катализатора ГИАП-10) способствует формированию дефектных состояний, выполняющих роль ловушек заряда и подавляющих рекомбинацию носителей. В совокупности это приводит к

СОДЕРЖАНИЕ

1. Химия и физикохимия композиционных материалов и нанокomпозитов

- Негматов С.С., Абед Н.С., Талипов Н.Х., Салимова С.А., Панжиев О.Х., Икрамова М.Э.** Исследование физико-химико-механических и технологических свойств выбранных минеральных ингредиентов их совместимость с водорастворимым полимером и структурирование в системе цемент-микрокремнезем и разработка эффективных составов композиционных тампонажных материалов на их основе..... 3
- Касимова М.Н., Негматова К.С., Икрамова М.Э., Бабаджанова М.А., Лапасова Ф.А.** Исследование свойств композиционных красителей на основе солей поливалентных металлов, применяемых для крашения природных волокон и тканей на их основе 9
- Негматов С.С., Хурсанов А.Х., Негматов Ж.Н., Абед Н.С., Икрамова М.Э., Рахимов Х.Ю., Курбонов У.М., Бозоров Д.** Разработка инновационной технологии получения композиционных химических флотореагентов – вспенивателей на основе органоминеральных ингредиентов с использованием местного сырья и отходов производств для извлечения цветных, редких и благородных металлов из пульпы медно-молибденовой руды 13
- Mengliyeva A.N., Kamalova D.I., Sultonov S.O’.** Polimer kompozit materiallar tuzilishining mexanik xossalarga asosiy ta’siri 15
- Inog’omov S.Y., Asrorov U.A.** Natriy-karboksimetiltsetillyuloza va poliakrilamid asosida olingan interpolimer kompleksini reologik xossalari o’rganish 19
- Bobonazarova S.H.** 2-xlor-n-tolilatsetamidlarining 8-oksixinolin alkaloidi bilan nukleofil almashinish reaksiyalari 25
- Амонова М.М., Рашитова Ш.Ш.** Термик фаоллаштирилган сапропель асосидаги сорбентларининг физик-кимёвий ва адсорбцион хусусиятлари 27
- Mamirov A.M., Olimov L.O.** Tarkibiga ishqoriy metall atomlari kiritilgan granullangan kremniy kompozit nanozarralari mikrotuzilmasi va morfologiyasi 30
- Сидрасулиева Г.Б., Айтмуратова А.Е., Муяссарова Р.И., Есиркепова В. К., Нурымбетова М.Т., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И.** Синтез и фотокаталитические свойства нанокomпозита O-g-C₃N₅/ZnO 33
- Негматов Ж.Н., Хурсанов А.Х., Негматов С.С., Бозоров Д., Курбонов У.М., Негматова К.С., Абед Н.С., Рахимов Х.Ю., Эрнийёзов Н.Б., Бозоров А.Н.** Композиционные химические флотореагент-вспениватель для извлечения цветных и благородных металлов в процессе флотации из пульпы медно-молибденовых руд 36
- Каримова Г.Ш., Гафуров Д.Н., Бозорова Н.Х.** Нанокomпозиты, полученные на основе полимеров и слоистых силикатов 39

2. Физико-механика и трибология композиционных материалов

- Абед Н.С., Негматов С.С., Бухаров С.Н., Сергиенко В.П., Косимов Ш.Б., Туляганова В.С., Бозоров А.Н., Шамсиева С.С., Эшкobilов О.Х., Джабаров Б.Т.** Исследование трибозлектрических процессов в полимерных покрытиях при взаимодействии с хлопком-сырцом 42
- Косимов Ш.Б., Абед Н.С., Негматов Ж.Н.** Исследование работоспособности и долговечности созданных деталей рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин и механизмов из антифрикционных и антифрикционно-износостойких полипропиленовых композиционных материалов.. 45
- Хаминов Б.Т.** Ультрадисперс титан карбид билан модификацияланган вольфрам карбид кобальтти қаттиқ қотишма бармоқларини руда майдалаш цехларида эксплуатацион шароитда апробациядан ўтказиш 47
- Tursunbayev S.A., To’raxo’jaeva A.N. Rizayeva N.M., Mahmudov F.M., Nurdinov Z.B.** Alyuminiy qotishmalarining suyuqoquvchanliligiga titan elementining ta’siri 49
- Ахмеджанов Ю.А., Махмудова Н.Х.** Определяющие соотношения процесса вспучивания композиционных материалов 51