

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОМ ТРИАЗИНОВОЙ СТРУКТУРЫ g-C₃N₄ НА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Комаров Е. К.¹, Пярниц Д. Ю.¹, Юрова В. Ю.¹
Научный руководитель – доктор химических наук Скорб Е. В.¹

¹Университет ИТМО
466241@niuitmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №324050 «Фотоуправляемые полимерно-электролитные системы для создания чувствительных элементов хемотронных сенсорных устройств».

Введение

Современное развитие промышленности сопровождается усилением антропогенной нагрузки на окружающую среду, что выражается в увеличении выбросов загрязняющих веществ и накоплении трудноразлагаемых отходов. Особую опасность представляют устойчивые органические загрязнители и оксиды азота (NO_x), для удаления которых применяются различные методы очистки. Однако существующие технологии зачастую характеризуются высокими энергетическими затратами и образованием вторичных отходов.

В связи с этим активно развиваются фотокаталитические методы очистки, основанные на использовании полупроводниковых материалов, активируемых солнечным светом. Перспективным фотокатализатором является графитоподобный нитрид углерода (g-C₃N₄), обладающий химической стабильностью, нетоксичностью и способностью поглощать излучение в видимой области спектра. Однако его практическое применение ограничено высокой скоростью рекомбинации электрон-дырочных пар и сравнительно невысокой удельной поверхностью. В качестве исходного материала использовался графитоподобный нитрид углерода (CN-MB), синтезированный из меламина-барбитуратной супрамолекулярной сборки при температуре 350 °С в инертной атмосфере [1]. Анализ литературы показывает, что одним из эффективных подходов к улучшению фотокаталитических свойств g-C₃N₄ является его модификация металлами, в частности железом [2]. Предполагается, что при этом возможно формирование координационных взаимодействий Fe-N, способствующих образованию центров захвата электронов и снижению вероятности их рекомбинации [3]. Вместе с тем вопросы оптимального способа введения допанта и его влияния на структуру и свойства материала требуют дополнительного изучения.

Основная часть

В работе проведена модификация g-C₃N₄, полученного из меламина-барбитурата, путем обработки сульфатом железа (II) в этаноле. Этанол использовался в качестве растворителя и среды обработки. Предполагается, что его взаимодействие со слоистой структурой g-C₃N₄ может способствовать частичному расслоению за счет ослабления межслоевых ван-дер-ваальсовых взаимодействий. После удаления растворителя это может приводить к увеличению доступной поверхности материала. Допирование осуществляли следующим образом: 0,8 г g-C₃N₄ смешивали с FeSO₄·7H₂O (0,06 г, 0,08 г и 0,1 г, что соответствовало 8, 10 и 13 мас. %) в 40 мл этанола. Смеси перемешивали в течение 5 часов, затем подвергали ультразвуковой обработке в течение 30 минут. Полученные суспензии фильтровали, осадок сушили при 105 °С в течение 20 минут и измельчали. Образцы обозначены как eg-C₃N₄/FeSO₄-8%, -10% и -13%.

Комплексное физико-химическое исследование (FT-IR, SEM, EDX) подтвердило присутствие железа в модифицированных образцах. В ИК-спектрах в области 500 - 700 см^{-1} наблюдаются дополнительные слабые полосы, которые могут быть связаны с колебаниями Fe-N и Fe-O, что указывает на взаимодействие железа с матрицей g-C₃N₄. Широкая полоса в области 3000-3500 см^{-1} соответствует валентным колебаниям N-H групп. В диапазоне 1200-1700 см^{-1} наблюдаются полосы, характерные для колебаний C-N и C=N триазиновых фрагментов, при этом пик около 1630 см^{-1} относится к колебаниям C=N, а полосы при 1400 и 1240 см^{-1} - к колебаниям C-N. Пик около 810 см^{-1} , соответствующий дыхательной моде триазинового кольца, в модифицированных образцах снижается по интенсивности, что может свидетельствовать о взаимодействии железа с азотсодержащими фрагментами структуры. EDX-анализ подтвердил наличие и относительно равномерное распределение железа в образцах (до 2 ат. %), что свидетельствует об успешной модификации материала. SEM-исследование показало сохранение исходной морфологии частиц после введения допанта, что указывает на отсутствие значительной агрегации или разрушения структуры.

Фотокаталитическую активность оценивали в реакции разложения родамина В под облучением 405 нм. Установлено, что образец eg-C₃N₄/FeSO₄-10% демонстрирует примерно в два раза более высокую константу скорости фотодеградации по сравнению с исходным g-C₃N₄. Повышение активности может быть связано с формированием центров захвата электронов, снижающих вероятность их рекомбинации и способствующих более эффективному протеканию фотоиндуцированных процессов.

Выводы

В результате работы получен модифицированный фотокатализатор на основе g-C₃N₄ с введением железа, демонстрирующий повышенную фотокаталитическую активность в реакции разложения органического красителя. Проведенные исследования подтверждают успешную модификацию материала и позволяют предположить формирование взаимодействий Fe с азотсодержащей матрицей g-C₃N₄. Практическая значимость работы заключается в перспективности применения полученных материалов в системах фотокаталитической очистки воды от органических красителей и других трудноокисляемых соединений. Разработанный подход может быть использован при создании фотоактивных покрытий и компонентов очистных систем.

Литература

1. Yurova, V. Yu., Piarnits, D. Yu., Moskalenko, I. V., Smirnov, I. S., Maltceva, I. V., Krylov, V. A., Sitnikova, V. E., Smirnov, E., & Skorb, E. V. (2025). Synthesis of g-C₃N₄ triazine-structure via modified low-temperature polycondensation of melamine-barbiturate. *Carbon Trends*, 10, 100522.
2. Duan, L., Li, G., Zhang, S., Wang, H., Zhao, Y., & Zhang, Y. (2020). Sulfur-doped photocatalysts with iron-nitrogen coordination bonds by modifying graphitic carbon nitride obtained from ammonium thiocyanate pyrolysis with ferrous sulfate heptahydrate in ethanol. *Applied Catalysis B: Environmental*, 271, 118929.
3. Mishra, A., Mehta, A., Basu, S., et al. (2019). A review on synthesis, modification method, and challenges of light-driven H₂ evolution using g-C₃N₄-based photocatalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 360–381.