

Газочувствительные сенсоры на основе полианилина для мониторинга CO, CH₄ и NO₂ при комнатной температуре

А.А. Имаш^{1,2}, Р.Б. Кажданбеков^{1,2*}, Г.Т. Смагулова^{2,3}, З.А. Мансуров^{1,2}

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

²Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный педагогический университет им. Абая, пр. Достык, 13, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена 60-летию профессора Лесбаева Бахытжана Тастановича – ведущего специалиста в области горения, наноматериалов и функциональных углеродных систем, внесшего весомый вклад в развитие междисциплинарных исследований на стыке нанотехнологий, энергетики и экологии. В условиях стремительного индустриального роста и увеличения объемов использования углеводородного топлива возрастает актуальность разработки эффективных сенсорных материалов для мониторинга токсичных газов, выделяющихся в процессе неполного сгорания. К числу наиболее опасных продуктов неполного сгорания углеводородного топлива относятся оксид углерода (CO), метан (CH₄) и диоксид азота (NO₂). Эти соединения обладают высокой токсичностью: оксид углерода вызывает гипоксию, метан способствует усилению парникового эффекта, а диоксид азота раздражает дыхательные пути и участвует в образовании фотохимического смога. Кроме того, они способствуют формированию вторичных загрязнителей, включая озон и мелкодисперсные аэрозоли. В данной работе исследован потенциал полимеризованного полианилина (ПАНИ) как газочувствительного материала, способного к селективному обнаружению указанных газов при комнатной температуре. Представлены экспериментальные данные, полученные при воздействии восстановительных и окислительных газов на чувствительный слой ПАНИ, синтезированного методом химической окислительной полимеризации. Проведен анализ механизмов взаимодействия, включая допирование, перенос заряда и влияние морфологических параметров на отклик. Определены ключевые факторы, влияющие на чувствительность, селективность, воспроизводимость и стабильность работы сенсора. Полученные данные подтверждают высокую эффективность полианилина как активного сенсорного материала и обосновывают его применение в составе гибких, энергоэффективных сенсорных платформ, ориентированных на экологический мониторинг и оптимизацию процессов горения с минимизацией вредных выбросов.

Ключевые слова: газочувствительные сенсоры, полианилин, мониторинг газов, диоксид азота (NO₂), оксид углерода (CO), метан (CH₄).

1. Введение

Современный этап индустриального развития сопровождается активным ростом числа автотранспортных средств и масштабным расширением промышленных производств. Одним из наиболее острых последствий этих процессов является загрязнение атмосферного воздуха, что представляет собой серьезную экологическую и

санитарно-гигиеническую проблему [1]. В результате неполного сгорания углеводородных топлив в атмосферу поступает широкий спектр токсичных газов, включая оксид углерода (CO), метан (CH₄) и диоксид азота (NO₂), которые характеризуются высокой токсичностью и оказывают негативное воздействие на здоровье человека и состояние экосистем [2]. Эти соединения могут вызывать острые и хронические отравления, заболевания дыхательной и сердечно-сосудистой систем, а также способствуют формированию фотохимического смога [3].

*Ответственный автор

E-mail: kazhdanbekov.ramazan@gmail.com

Важной составляющей выбросов, возникающих при сгорании углеводородов, являются углеродные частицы и органические соединения, включая полициклические ароматические углеводороды (ПЦАУ). Особенно интересен феномен низкотемпературного сажеобразования, наблюдаемый в так называемых «холодных» пламенах при температурах 500–1200 К [4]. В этих условиях ПЦАУ выступают ключевыми промежуточными продуктами, способствующими зарождению сажевых частиц. Исследования показали, что механизм образования сажи в этих условиях отличается от классического пиролиза и термического разложения и сопровождается образованием большого количества экстрагируемых органических соединений, в том числе ПЦАУ [5].

Одновременно с этим пламенные процессы находят широкое применение в качестве высокоэнергетических реакционных сред для целенаправленного синтеза углеродных наноматериалов. Благодаря высокой температуре и присутствию свободных радикалов, в пламени возможны сверхбыстрые процессы самосборки наночастиц – за миллисекунды формируются сажа [6], фуллерены [7], углеродные нанотрубки [8] и графеновые структуры [9]. Преимуществами метода являются самоподдерживающийся характер реакций, отсутствие необходимости во внешнем источнике энергии и возможность масштабирования.

В частности, при горении бензол-кислородных смесей в ламинарных режимах при пониженном давлении были получены фуллерены C_{60} и C_{70} с выходом до 15% в оптимальных зонах пламени [7]. Использование металлоорганических катализаторов, таких как $Fe(CO)_5$ или $Ni(NO_3)_2$, позволяет получать жгуты углеродных нанотрубок диаметром 20–30 нм, а также формировать супергидрофобные углеродные покрытия на различных подложках, обладающие уникальными физико-химическими свойствами [8].

Таким образом, контроль условий горения (температуры, давления, состава топлива и окислителя) позволяет управлять составом и морфологией получаемых углеродных структур – от фуллеренов и графенов до сажевых агломератов. Это открывает перспективы использования пламенных процессов как эффективного метода синтеза наноматериалов [10].

На фоне стремительного развития этих направлений особую актуальность приобретает задача мониторинга содержания токсичных газов и продуктов горения в атмосфере. Надежные системы

непрерывного контроля газовых выбросов необходимы как для обеспечения промышленной безопасности, так и для оптимизации технологических процессов с целью снижения вредных выбросов и повышения энергоэффективности [11, 12].

В последние годы большой интерес вызывают газочувствительные материалы на основе проводящих полимеров, которые, благодаря уникальному сочетанию физико-химических свойств, открывают новые перспективы в области создания компактных, энергоэффективных и высокочувствительных сенсорных устройств [13, 14]. Такие материалы способны работать при низких температурах, что значительно снижает энергозатраты по сравнению с традиционными сенсорами на основе металлических оксидов, требующими высоких температур для активации [15].

Полианилин (ПАНИ) [16, 17] выделяется среди проводящих полимеров, благодаря своей высокой чувствительности к окислительным газам, химической стабильности, доступности и относительно простому способу синтеза. Этот полимер может эффективно изменять свою электронную проводимость в ответ на взаимодействие с различными газообразными веществами, что обусловлено процессами допирования и дедопирования [18], а также изменениями в морфологии и электрохимическом состоянии материала [19]. Эти характеристики делают ПАНИ одним из наиболее перспективных материалов для создания сенсоров, работающих в условиях комнатной температуры.

Кроме того, возможность химической модификации и композитного сочетания ПАНИ с наноматериалами (например, оксидами металлов или углеродными наноструктурами) позволяет значительно улучшить селективность, чувствительность и скорость отклика сенсоров [20–22]. Это особенно важно для детекции низких концентраций токсичных газов в сложных газовых смесях, характерных для промышленных выбросов и городской среды [23, 24]. Например, ПАНИ, модифицированный с помощью металлов, таких как Au или Pt, показывает улучшенную чувствительность к газам за счет увеличения активной поверхности и каталитической активности [25, 26]. Полимерные сенсоры могут также содержать полимерные нанокомпозиты, которые сочетают в себе преимущества проводящих полимеров и наноматериалов для достижения лучших характеристик обнаружения газов [27, 28].

С точки зрения полупроводниковой классификации, проводящие полимеры, включая полиани-

лин, ведут себя преимущественно как p, n-типные материалы, то есть перенос заряда в них осуществляется дырками (положительно заряженными носителями). В ПАНИ источником дырочной проводимости служат p-поляроны и биполяроны, возникающие при протонировании азотсодержащих центров основной цепи. Чем выше степень протонирования, тем больше концентрация положительных носителей и, соответственно, тем ниже сопротивление. Среди всех окислительно-восстановительных форм ПАНИ именно эмеральдиновая соль обладает оптимальным балансом между стабильно высокой проводимостью и химической стойкостью: в этой фазе каждая вторая единица повторяющейся структуры носит положительный заряд, формируя протяженную поляронную полосу, которая обеспечивает эффективный дырочный транспорт [29].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований сенсорной активности ПАНИ в отношении таких ключевых загрязнителей, как CO, CH₄ и NO₂. Обсуждаются механизмы взаимодействия полимерного материала с газами, анализируются факторы, влияющие на чувствительность и селективность, а также рассматриваются перспективы применения полианилиновых сенсоров в системах контроля качества воздуха и безопасности промышленных процессов.

Таким образом, исследование и развитие газочувствительных материалов на основе полианилина открывают новые возможности для создания эффективных и доступных технологий мониторинга, способствующих охране окружающей среды и здоровью населения. Целью настоящей работы являются синтез и исследование сенсорных свойств полимеризованного полианилина, направленные на выявление закономерностей его взаимодействия с токсичными газами (CO, CH₄ и NO₂) при различных условиях, а также определение потенциала данного материала для применения в низкотемпературных газовых сенсорах.

2. Материалы и методы исследования

Для синтеза полианилина использовали анилин (C₆H₅NH₂), соляную кислоту (37% HCl) и персульфат аммония ((NH₄)₂S₂O₈). Полимеризацию анилина проводили в кислой среде, для этого в термостойкий стакан добавляли 2,5 мл 1 М HCl и 0,227 мл анилина, смесь перемешивали на магнитной мешалке при температуре 0–5 °С в ледяной бане. Отдельно 0,57 г персульфата аммония ((NH₄)₂S₂O₈) растворяли в 1,82 мл деионизиро-

ванной воды и по каплям добавляли в раствор анилина. Реакция протекала при перемешивании в течение 2 часов. Образовавшийся осадок отфильтровывали под вакуумом, промывали сначала 40 мл 1 М HCl, затем 10 мл ацетона, сушили при температуре 70 °С в течение 24 часов. В результате был получен темно-зеленый порошок полианилина.

Для исследования газочувствительных свойств использовались одноканальный потенциостат/гальваностат (CS350M, Wuhan Corrtest Instruments, Китай), интегральный цифровой электрод (ИЦЭ), массовый расходомер (MB-2SLPM-D, Alicat, США) и герметичная стальная ячейка объемом 250 мл. ПАНИ был нанесен на поверхность ИЦЭ методом центрифугирования с использованием спин-котера (CY-SP4, Zhengzhou Cy Scientific Instrument Co., Ltd., Хэнань, Китай) при скорости вращения 3000 об/мин в течение 120 секунд. Электроды соединяли с сенсорными чипами размером 5×8 мм и толщиной 10 мкм, оснащенными ИЦЭ-контактами из золота (Au). В качестве тестовых газов использовали CO, CH₄ и NO₂ в концентрациях по 500 ppm (ГСО 12331-2023). Характеристики отклика регистрировали с помощью программного обеспечения потенциостата.

Поведение чистого ПАНИ исследовали при воздействии восстановительных (CH₄, CO) и окислительных (NO₂) газов при концентрации 500 ppm и комнатной температуре. Оценивались ключевые сенсорные параметры: отклик (R), время отклика (τ₁) и время восстановления (τ₂). Отклик выражается следующим образом:

$$R = \left| \frac{R_{N_2} - R_a}{R_a} \right| \cdot 100\%$$

где R_{N₂}, R_a – электрическое сопротивление датчика в азоте и анализе соответственно. Время отклика определяется как время, необходимое для достижения 90% максимального отклика, а время восстановления – это время, необходимое для возврата к 90% начального сопротивления.

Морфологические и структурные свойства ПАНИ были исследованы с использованием комплекса современных аналитических методов. Морфология и структурные особенности образцов изучались с помощью растрового электронного микроскопа высокого разрешения (FESEM, Auriga Crossbeam 540, Carl Zeiss, Оберкохен, Германия), оснащенного системой энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDS, Oxford Instruments, программное обеспечение AZtec 6.0), в лаборатории электронной микроскопии

Центра коллективного пользования Назарбаев Университета (Астана, Казахстан). Средние размеры частиц определялись с использованием программного обеспечения ImageJ. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭ) проводилась на спектрометре PHI Quantera II (Нанкин, Китай) в лаборатории Нанкинского университета науки и технологии. Раман-спектроскопический анализ проводился на спектрометре NT-MDT NTegra Spectra с лазером возбуждения $\lambda = 473$ нм и точностью по шкале волновых чисел $\pm 0,5\%$ в Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан). Микроструктура поверхности интегрального цифрового электрода (ИЦЭ) анализировалась при помощи оптического микроскопа Levenhuk MED 30T (Medi Microscope) с увеличением 40 $\times$ и 50 $\times$ в Институте проблем горения (Алматы, Казахстан).

3. Результаты и обсуждение

Сканирующая электронная микроскопия (рис. 1) показала, что синтезированный полианилин характеризуется шаровидной морфологией частиц. Частицы ПАНИ представлены в виде округлых частиц со средним диаметром от 200 до 800 нм,

склонных к агрегации. Агломераты частиц формируют пористую неупорядоченную структуру с большим количеством пустот и полостей между частицами.

Такая морфология типична для ПАНИ, полученного методом окислительной полимеризации в кислой среде, и может быть связана с быстрым осаждением полимера и формированием случайных межчастичных связей.

Внутренние поверхности агломератов выглядят рыхлыми и неоднородными, что может свидетельствовать о высокой площади поверхности, благоприятной для процессов сорбции или взаимодействия с газами. Такая структура также может способствовать улучшенному проникновению молекул вглубь материала, что особенно важно для сенсорных применений [30]. Подобная морфология часто описывается как «sponge-like» («губкообразная») или квазипористая и характерна для полимеров проводящего типа, таких как ПАНИ, особенно при использовании персульфата аммония в качестве окислителя [31–33]. На рис. 2(а) представлена рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФС, XPS), которая подтверждает наличие в образце основных элементов – углерода (C 1s), азота (N 1s) и кислорода (O 1s) [34].

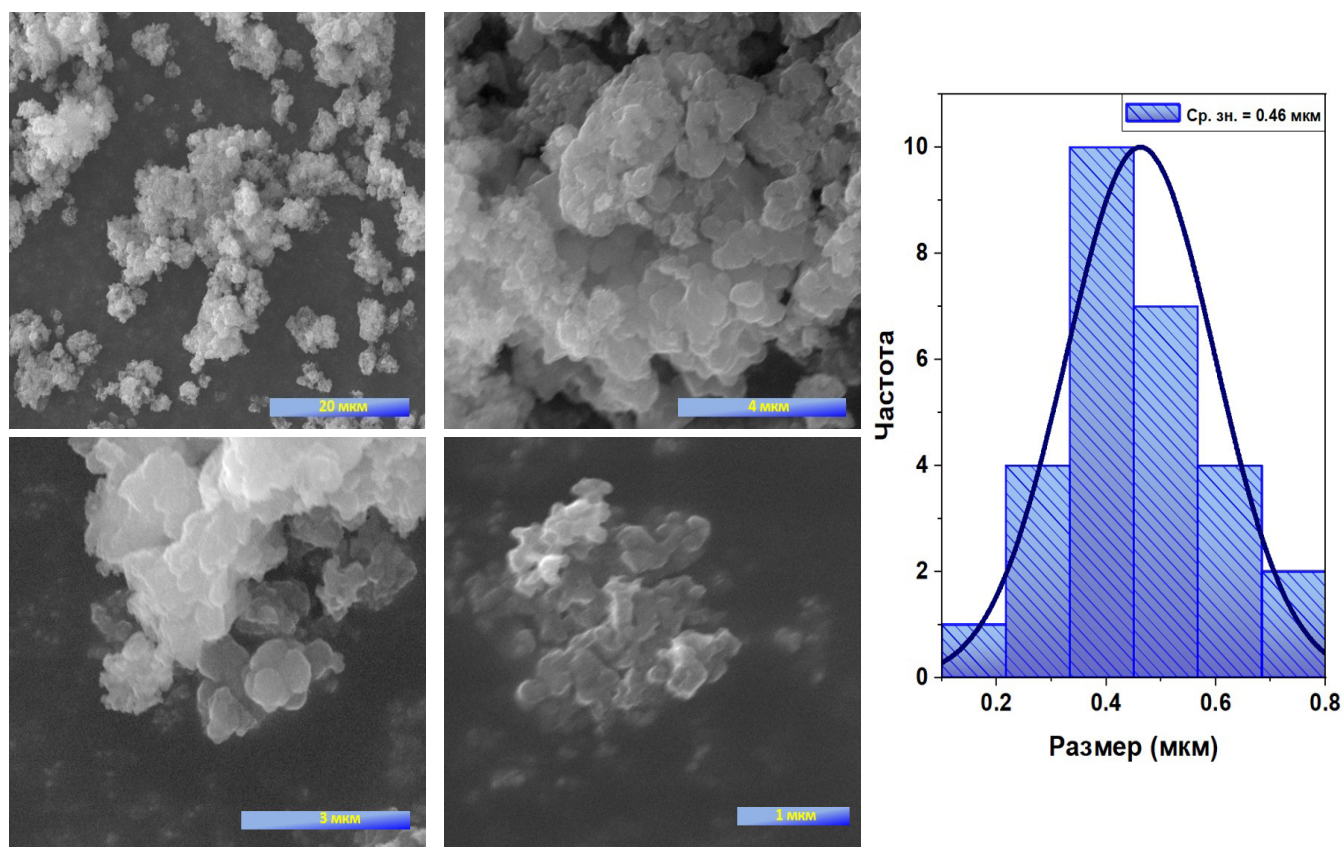


Рис.1. СЭМ-изображение синтезированного полианилина.

Деконволюция пиков C 1s, представленная на рис. 2(б), выявила компоненты при ~284.5 эВ, соответствующие связям C–C/C–H в ароматическом кольце, при ~285.5 эВ – связям C–N/C=N, а также при ~286.2 эВ – аминогруппам (–NH–), характерным для восстановленной формы полианилина. Небольшой пик в области ~288.5 эВ указывает на присутствие незначительного количества окисленных углеродных групп (C=O). На рис. 2(в) приведен спектр N 1s, в котором наблюдаются пики при 398.5 эВ и 399.3 эВ, соответствующие аминным (–NH–) и иминным (=N–) структурам. При этом сигнал, характерный для протонированных аминогрупп (–NH⁺), отсутствует или выражен слабо.

Такое распределение химических состояний азота указывает на преобладание восстановленной, непротонированной формы полианилина (лейкоэмеральдина), обладающей низкой собственной проводимостью. В литературе данная форма может соотноситься с полупроводниковым поведением n-типа, где основными носителями заряда являются электроны [35, 36].

Рамановская спектроскопия подтверждает структуру полученного полианилина, что отражено на рис. 2 (г) [37]. На спектре наблюдаются характерные пики при 823 и 871 см^{–1}, относящиеся к лейкоэмеральдиновой форме, а также интенсивные полосы при 1187, 1322 и 1619 см^{–1}. Пик при 1187 см^{–1} соответствует деформационным колебаниям C–H в бензоидных кольцах, пик при 1322 см^{–1} связан с полярными колебаниями C–N, а наиболее интенсивный пик при 1619 см^{–1} отражает хиноидную структуру [38]. Высокая интенсивность пиков, связанных с полярными и хиноидными колебаниями, в сочетании с выраженной полосой бензоидных колец свидетельствует о стабильно протонированной и частично окисленной эмеральдиновой форме полианилина, обладающей хорошей электропроводностью [39]. Таким образом, комплексный анализ РФС и рамановских спектров подтверждает успешное получение проводящего полианилина в его полуокисленной и протонированной эмеральдиновой форме. Проводимость ПАни определяется двумя основными

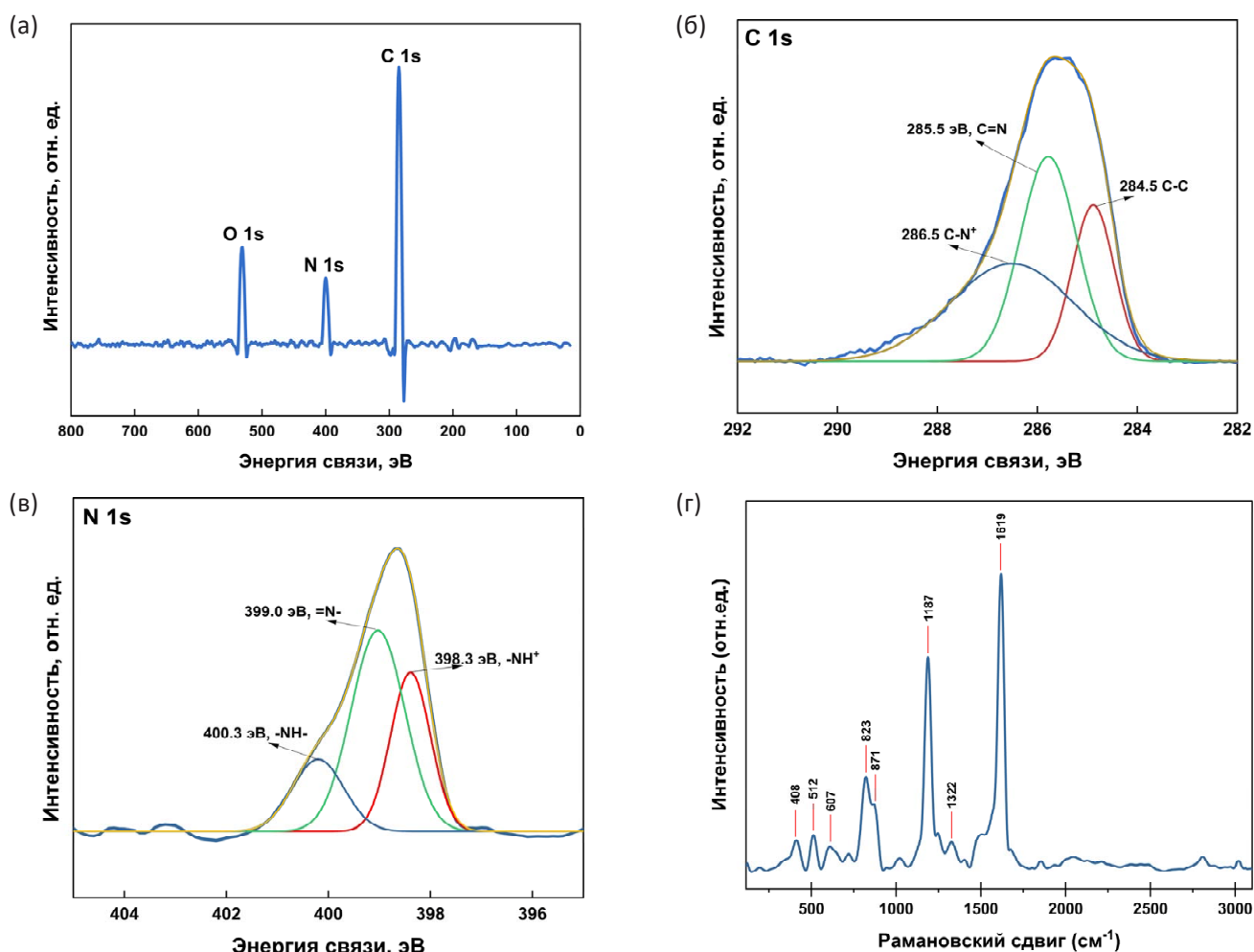


Рис. 2. Результаты спектроскопического анализа, синтезированного полианилина: (а) спектр РФС; (б) деконволюция пиков C 1s; (в) деконволюция пиков N 1s; (г) рамановская спектроскопия.

ми механизмами: делокализацией (переносом) заряда вдоль полимерных цепей и туннельными переходами (прыжками) носителей заряда между соседними цепями. Эти процессы зависят от структуры материала и условий протонирования [40, 41]. Кислотное протонирование повышает степень проводимости ПАНИ без необходимости окислительно-восстановительной реакции, в то время как основное депротонирование снижает ее. Как показано на рис. 3-5, чувствительный слой ПАНИ формирует проводящий мост между контактами ИЦЭ, что позволяет регистрировать изменения сопротивления при контакте с анализируемыми газами.

Метан (CH_4) представляет собой химически стабильный углеводород с низкой реакционной способностью при комнатной температуре. Однако при его взаимодействии с ПАНИ наблюдается изменение электрического сопротивления, что связано с слабым донорным эффектом молекул метана. В процессе взаимодействия метана с поверхностью ПАНИ молекулы газа частично передают электроны в проводящую зону полимера, что приводит к увеличению концентрации основных носителей заряда – электронов. Повышение плотности электронов способствует усилению проводимости материала, вследствие чего наблюдается заметное снижение сопротивления сенсорного слоя [35]. Согласно данным, представленным на рис. 3, при воздействии CH_4 сенсор продемонстрировал отклик величиной 7,89% в соответствии с уравнением 1. Несмотря на то, что метан является слабым восстановительным агентом, время отклика составило 104 сек, а вре-

мя восстановления – 4,23 мин (рис. 3). Полученные параметры указывают на преобладание процессов поверхностной адсорбции и десорбции, а также на ограниченную кинетику взаимодействия при комнатной температуре.

Так, например, в работе [40] были получены тонкие пленки органического полупроводникового полимера поли(4-броманилина) методом электроосаждения в условиях окислительной полимеризации. Формирование пленки осуществлялось на поверхности кремниевой подложки. Электропроводящие свойства поли(4-броманилина) объясняются эффективной делокализацией π -электронов между аминогруппами и ароматическим кольцом, что обеспечивает высокую подвижность носителей заряда. При воздействии восстановительных газов, таких как водород, происходит увеличение концентрации электронов в проводящей зоне полимера, что приводит к снижению его электрического сопротивления – типичному поведению для сенсорных материалов n-типа. Аналогичное поведение наблюдается и в случае полианилина: воздействие донорных газов приводит к накоплению электронов, что также сопровождается снижением сопротивления вследствие повышения концентрации носителей заряда.

Оксид углерода представляет собой более активный восстановитель по сравнению с такими газами, как CH_4 , H_2 . Это обусловлено высокой способностью CO к взаимодействию с кислородсодержащими адсорбированными видами на поверхности сенсорного материала. При воздействии CO на полимерную матрицу на основе по-

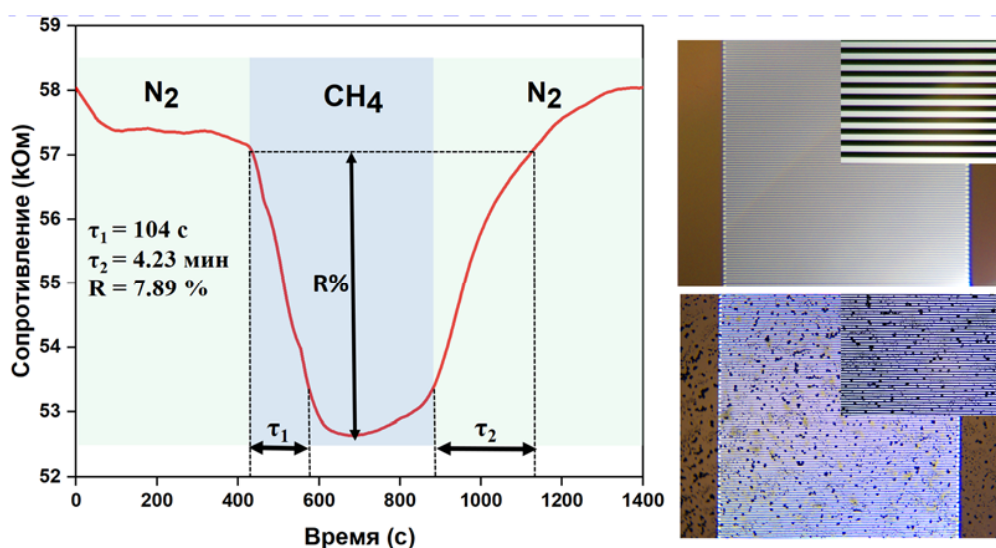


Рис. 3. Газочувствительный отклик полианилина на газообразный метан (CH_4) при концентрации 500 ppm и оптические снимки ИЦЭ до/после нанесения ПАНИ.

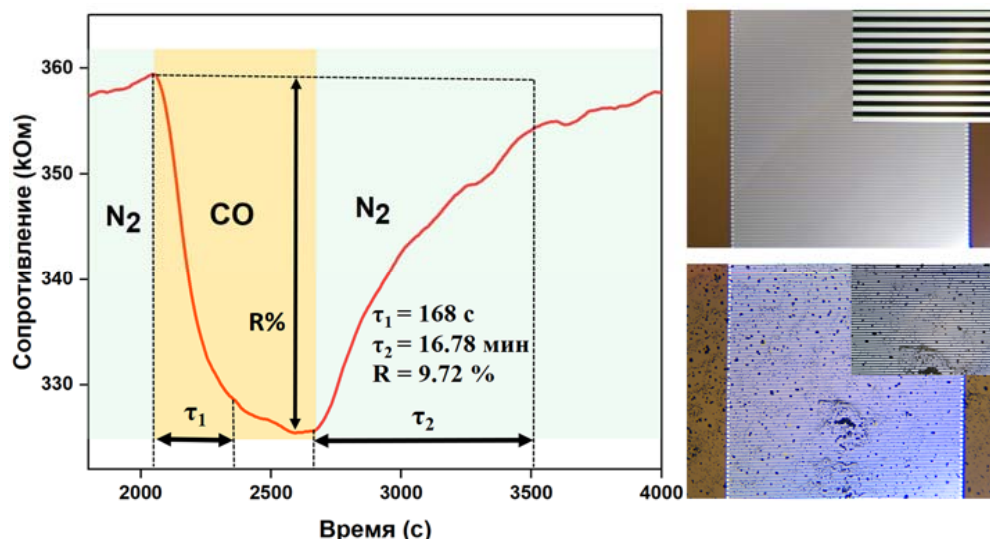


Рис. 4. Газочувствительный отклик полианилина при экспозиции к окиси углерода (CO) и оптические снимки ИЦЭ до/ после нанесения ПАНИ.

лианилина, обладающего проводимостью n-типа, наблюдается снижение электрического сопротивления. Указанный эффект связан с восстановлением поверхностных анионных форм кислорода $O_2^-(адс)$, что приводит к уменьшению концентрации дырок (h^+) и соответствующему увеличению плотности электронов в зоне проводимости.

Предполагаемый механизм сенсорного отклика включает окислительно-восстановительные превращения в структуре ПАНИ, в частности частичное восстановление его проводящей эмеральдиновой формы до лейкоэмеральдиновой. В результате данного превращения высвобождаются электроны, которые рекомбинируют с дырками в полупроводниковой матрице, что приводит к подавлению р-типной проводимости и, как следствие, к снижению общего сопротивления материала. Сенсорный отклик, рассчитанный по уравнению (1), составил 9,72%, что свидетельствует о высокой чувствительности к CO.

Отклик сенсора при воздействии CO составил 168 сек, тогда как восстановление сигнала до исходного уровня заняло 16,78 мин (рис. 4). Это указывает на частично обратимый характер взаимодействия CO с активной поверхностью сенсора и на замедленные процессы десорбции восстановленного кислорода, а также на необходимость времени для восстановления исходной проводящей структуры ПАНИ.

Аналогичный эффект уменьшения сопротивления при воздействии CO на ПАНИ был также продемонстрирован в работе [42], где сообщается о снижении поверхностного сопротивления и его восстановлении после удаления газа. Это подтверждает наличие обратимых окислитель-

но-восстановительных превращений, вовлеченных в процесс газочувствительности ПАНИ. Механизм обнаружения CO может быть описан с позиций кинетики Ленгмюра первого порядка, предполагающей монослойную адсорбцию газа на поверхности с последующей десорбцией. Скорость адсорбции при этом пропорциональна концентрации CO, а десорбция зависит от степени покрытия активных центров.

Рис. 5 иллюстрирует изменение сопротивления полианилина при воздействии диоксида азота, который является сильным окислителем с выраженной электроноакцепторной способностью. Под действием NO_2 происходит захват электронов из проводящей зоны ПАНИ, что приводит к усилению локализации дырок и, как следствие, значительному увеличению сопротивления. Согласно экспериментальным данным, сопротивление материала возрастает с 103 до 201 МОм, что соответствует сенсорному отклику 95,2%.

Механизм сенсорного отклика обусловлен тем, что молекулы NO_2 взаимодействуют с π -электронной системой полианилина, отбирая электроны и увеличивая степень его протонирования. Это приводит к образованию поляронов и биполяронов, а, следовательно, к временной активации проводимости. Однако при длительном воздействии и высоких концентрациях наблюдается эффект так называемого перелегирования – чрезмерное насыщение структуры заряженными носителями нарушает электронную когерентность вдоль цепей, вызывая локальные структурные ионные искажения. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению подвижности зарядов и росту сопротивления.

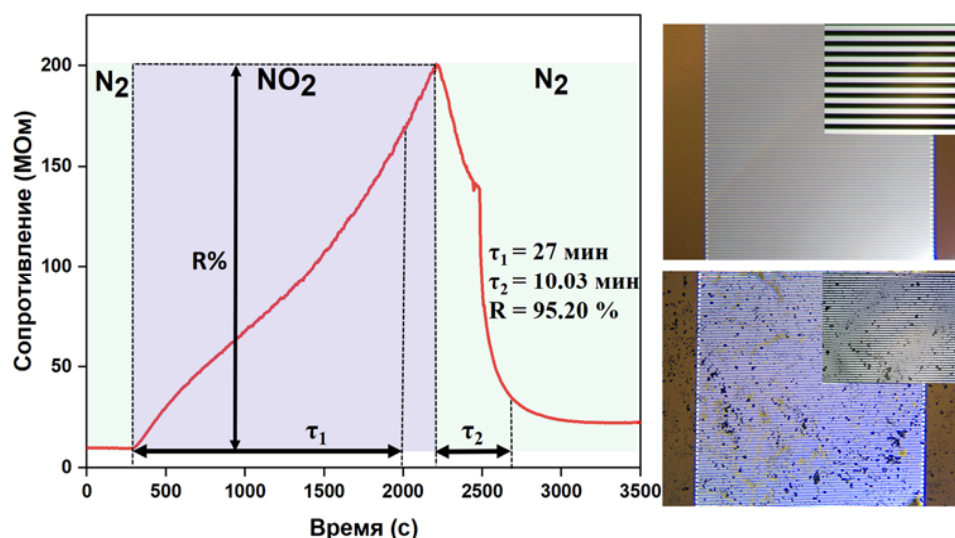


Рис. 5. Газочувствительный отклик полианилина при экспозиции к диоксиду азота (NO_2) и оптические снимки ИЦЭ до и после нанесения ПАНИ.

Аналогичное поведение ПАНИ под действием NO_2 описано в работе [43], где было зафиксировано увеличение сопротивления на 85–100% при концентрации 100 ppm, а восстановление происходило лишь при интенсивной продувке инертным газом. Авторы объясняют данный эффект образованием устойчивых донорно-акцепторных комплексов на поверхности полимера. Кроме того, как отмечается в исследовании [44], NO_2 вызывает наиболее выраженные структурно-электронные перестройки в ПАНИ, сопровождающиеся нелинейной динамикой отклика и восстановлением, особенно при продолжительной экспозиции.

Проведенные исследования газочувствительных свойств синтезированного материала на основе полианилина при воздействии трех различных газов – метана, окиси углерода и диоксида азота – позволили детально охарактеризовать особенности сенсорного отклика материала в зависимости от природы газофазного анализата. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о дифференцированной чувствительности ПАНИ к восстановительным (CH_4 , CO) и окислительным (NO_2) агентам, а также различной кинетике сенсорного отклика в зависимости от химических характеристик газов.

При экспозиции метана – наименее реакционноспособного из исследуемых газов – фиксировался умеренный сенсорный отклик, составляющий 7,89%, при этом восстановление сигнала до исходного уровня происходило в течение 4,23 минуты. Это указывает на способность ПАНИ взаимодействовать даже с химически слабоактивными соединениями, обладающими низкой склонностью

к передаче электронов. Такой отклик обусловлен частичным восстановлением адсорбированных кислородсодержащих групп на поверхности материала несмотря на слабую восстановительную способность CH_4 при комнатной температуре.

В случае воздействия окиси углерода, характеризующейся более выраженной способностью к участию в реакциях электронного донорства, наблюдался более интенсивный сенсорный отклик – 9,72%, что отражает высокую химическую активность CO по отношению к поверхностным кислородным видам. Вместе с тем процесс десорбции восстановленных кислородных компонентов с поверхности ПАНИ оказался значительно более медленным, что обусловило длительное время восстановления, составляющее 16,78 минуты. Такая задержка может быть связана с глубокой перестройкой электронного строения полимера и образованием промежуточных стабильных поверхностных комплексов.

Наиболее выраженный отклик наблюдался при взаимодействии с NO_2 – сильным акцептором электронов и типичным окислительным агентом. В этом случае фиксировался резкий рост сопротивления ПАНИ – до 95,2%, что свидетельствует о существенном нарушении проводящих путей в полимерной матрице. Механизм данного взаимодействия, вероятно, включает усиленное протонирование азотсодержащих фрагментов ПАНИ и формирование устойчивых электронно-акцепторных комплексов, приводящих к частичной деполимеризации или перелегированию материала и значительному изменению его электронных свойств.

Сравнительная табл. 1 демонстрирует, что ПАНИ обладает выраженной чувствительностью как к восстановительным, так и окислительным газам, причем характер отклика варьируется в зависимости от типа газа и его концентрации. Отмечается, что отклик на окислительные газы, такие как NO_2 , как правило, выше, чем на восстановительные (например, CO и CH_4), что связано с природой взаимодействия газа с проводящей структурой ПАНИ. Также наблюдается увеличение отклика с ростом концентрации газа, что свидетельствует о потенциальной применимости материала в качестве активного слоя для создания сенсоров с возможностью полук количественного анализа. Время отклика и восстановления зависит как от типа газа, так и от его концентрации: восстановительные газы обычно вызывают более быстрый отклик, в то время как для окислительных характерны более продолжительные процессы восстановления.

Таким образом, совокупность полученных данных указывает на высокую чувствительность и воспроизводимость отклика ПАНИ – сенсора при воздействии газов различной природы. Возможность функционирования при температуре окружающей среды без необходимости дополнительного нагрева открывает перспективы для разработки на его основе недорогих, энергоэффективных сенсорных устройств для мониторинга загрязнителей воздуха. Представленные результаты могут служить научной основой для последующей модификации ПАНИ, включая создание композитных систем с расширенным диапазоном селективности, улучшенной стабильностью и ускоренной динамикой отклика.

4. Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность применения полианилина в качестве сенсорного материала для детекции токсичных газов, таких как метан, оксид углерода и диоксид азота. Даже в случае малореакционноспособного метана зафиксирован отклик на уровне 7,89%, что свидетельствует о способности ПАНИ взаимодействовать с химически инертными соединениями за счет частичного восстановления кислородсодержащих групп на поверхности полимера.

Для CO наблюдался более выраженный сенсорный отклик около 10%, что связано с его способностью участвовать в реакциях передачи электронов и взаимодействовать с активными поверхностными центрами. Такие изменения указывают на высокую чувствительность ПАНИ к газам, обладающим умеренной химической активностью, а также на возможное формирование стабильных поверхностных комплексов, влияющих на электронную структуру материала.

Максимальный отклик (95,2%) отмечен при воздействии NO_2 – сильного акцептора электронов и типичного окислителя. Взаимодействие с NO_2 приводит к существенным изменениям проводящей матрицы ПАНИ, вероятно, вследствие усиленного протонирования и образования электронно-акцепторных комплексов. Полученные результаты подтверждают высокую перспективность полианилина как сенсорного материала для систем экологического мониторинга, способных эффективно работать при комнатной температуре и обеспечивать селективное обнаружение широкого спектра токсичных газов.

Таблица 1. Сравнение характеристик ПАНИ по отношению к восстановительным и окислительным газам при комнатной температуре

Материал	Отклик, %	Время отклика, с	Время восстановления, с	Аналит	Концентрация, ppm	Источник
Полианилин	12,5	320	110	CH_4	1000	[22]
	9,4	-	-	CO	1000	[42]
	27	180	200	CO	6000	[45]
	27	45	660	NO_2	50	[46]
	18	900	-	NO_2	10	[47]
	9,72	168	1006	CO	500	Данная работа
	7,89	104	253	CH_4	500	Данная работа
	95,20	1620	601	NO_2	500	Данная работа

Благодарность

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по проекту ИРН AP19679885.

Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Kobald A., Weimar U., Bârsan N. Towards understanding temperature modulated SMOX gas sensor arrays for outdoor air quality applications // *Sens. Actuators B Chem.* – 2025. – Т. 440. – С. 137879.
- [2]. Kohse-Höinghaus K. Combustion, Chemistry, and Carbon Neutrality // *Chem. Rev.* – 2023. – Т. 123, № 8. – С. 5139–5219.
- [3]. Dhall S. et al. A review on environmental gas sensors: Materials and technologies // *Sens. Int.* – 2021. – Т. 2. – С. 100116.
- [4]. Штерн В.Я. Механизм окисления углеводов в газовой фазе. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 302 с.
- [5]. Böhm H. et al. The influence of pressure and temperature on soot formation in premixed flames // *Symp. (Int.) Combust.* – 1989. – Т. 22, № 1. – С. 403–411.
- [6]. Нажипкызы М., Мансуров З.А., Пури И.К., и др. // *Нефть Газ.* – 2010. – Т. 5, № 59. – С. 27.
- [7]. Мансуров З.А., Приходько Н.Г., Савельев А.В. Образование ПЦАУ, фуллеренов, углеродных нанотрубок и сажи в процессах горения. – Алматы: КазНУ, 2012. – 383 с.
- [8]. Мансуров З.А. // *Физ. горения взрыва.* – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 77.
- [9]. Mansurov Z.A. et al. Synthesis of single and few layer graphenes in flames // *Proc. Eur. Combust.* – 2015. – С. 1.
- [10]. Mansurov Z. Soot formation. – Almaty: Kazak Univ., 2015. – 167 p.
- [11]. Wu Q., Ding Z., Zhang W. Research progress on electrochemical gas sensors for fire detection // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2025. – С. 101043.
- [12]. Chesler P., Hornoiu C. MOX-based resistive gas sensors with different types of sensitive materials (powders, pellets, films), used in environmental chemistry // *Chemosensors.* – 2023. – Т. 11, № 2. – С. 95.
- [13]. Liu X. et al. Conducting polymer-based nanostructures for gas sensors // *Coord. Chem. Rev.* – 2022. – Т. 462. – С. 214517.
- [14]. Farea M.A. et al. Hazardous gases sensors based on conducting polymer composites // *Chem. Phys. Lett.* – 2021. – Т. 776. – С. 138703.
- [15]. Park C.S. et al. Ultrafast room temperature synthesis of porous polythiophene via atmospheric pressure plasma polymerization technique and its application to NO₂ gas sensors // *Polymers.* – 2021. – Т. 13, № 11. – С. 1783.
- [16]. Sustkova H., Voves J. Modeling a multiple-chain emeraldine gas sensor for NH₃ and NO₂ detection // *Beilstein J. Nanotechnol.* – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 721–729.
- [17]. Kroutil J. et al. Gas sensor with different morphology of PANI layer // *Sensors.* – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 1106.
- [18]. Srinivas C.H. et al. Synthesis and characterization of nano size conducting polyaniline // *IOSR J. Appl. Phys.* – 2012. – Т. 1, № 5. – С. 12–15.
- [19]. Kroutil J. et al. A chemiresistive sensor array based on polyaniline nanocomposites and machine learning classification // *Beilstein J. Nanotechnol.* – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 411–423.
- [20]. Kumar M. et al. A novel gas sensor based on activated charcoal and polyaniline composites for selective sensing of methanol vapors // *Sens. Actuators A Phys.* – 2023. – Т. 353. – С. 114210.
- [21]. Abdulla S., Mathew T. L., Pullithadathil B. Highly sensitive, room temperature gas sensor based on polyaniline-multiwalled carbon nanotubes (PANI/MWCNTs) nanocomposite for trace-level ammonia detection // *Sens. Actuators B Chem.* – 2015. – Т. 221. – С. 1523–1534.
- [22]. Navazani S. et al. Fabrication and characterization of a sensitive, room temperature methane sensor based on SnO₂@ reduced graphene oxide-polyaniline ternary nanohybrid // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 2018. – Т. 88. – С. 139–147.
- [23]. Kashyap R. et al. Polyaniline nanofibers based gas sensor for detection of volatile organic compounds at room temperature // *Mater. Res. Express.* – 2019. – Т. 6, № 11. – С. 1150d3.
- [24]. Gaikwad G. et al. Synthesis and evaluation of gas sensing properties of PANI based graphene oxide nanocomposites // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2017. – Т. 218. – С. 14–22.
- [25]. Tian X. et al. Pt/MoS₂/polyaniline nanocomposite as a highly effective room temperature flexible gas sensor for ammonia detection // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2023. – Т. 15, № 7. – С. 9604–9617.
- [26]. Han D. et al. Machine-learning-assisted n-GaN-Au/PANI gas sensor array for intelligent and ultra-accurate ammonia recognition // *Chem. Eng. J.* – 2024. – Т. 495. – С. 153705.
- [27]. Feng Q. et al. Preparation and gas sensing properties of PANI/SnO₂ hybrid material // *Polymers.* – 2021. – Т. 13, № 9. – С. 1360.

- [28]. Kumar R. et al. Development of cost effective metal oxide semiconductor based gas sensor over flexible chitosan/PVP blended polymeric substrate // *Carbohydr. Polym.* – 2020. – Т. 239. – С. 116213.
- [29]. Masemola C. M. et al. Advances in Polyaniline-Based Composites for Room-Temperature Chemiresistor Gas Sensors // *Processes.* – 2025. – Т. 13, № 2. – С. 401.
- [30]. Budi S. et al. Preparation of high surface area and high conductivity polyaniline nanoparticles using chemical oxidation polymerization technique // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2018. – Т. 983, № 1. – С. 012162.
- [31]. Sun Q., Park M. C., Deng Y. Studies on one-dimensional polyaniline (PANI) nanostructures and the morphological evolution // *Mater. Chem. Phys.* – 2008. – Т. 110, № 2–3. – С. 276–279.
- [32]. Wang J. et al. A novel strategy for the synthesis of polyaniline nanostructures with controlled morphology // *React. Funct. Polym.* – 2008. – Т. 68, № 10. – С. 1435–1440.
- [33]. Boeva Z. A., Sergeyev V. G. Polyaniline: Synthesis, properties, and application // *Polym. Sci. Ser. C.* – 2014. – Т. 56, № 1. – С. 144–153.
- [34]. Wang W. Vapor phase infiltration (VPI) and doping of conducting polymers: диссертация. – Universidad del País Vasco–Euskal Herriko Unibertsitatea, 2017.
- [35]. Wana Y. et al. The effect of carbon nanotube dispersion on CO gas sensing characteristics of polyaniline gas sensor // *J. Nanosci. Nanotechnol.* – 2006. – Т. 6, № 12. – С. 3893–3896.
- [36]. Huang J. et al. Polyaniline nanofibers: facile synthesis and chemical sensors // *J. Am. Chem. Soc.* – 2003. – Т. 125, № 2. – С. 314–315.
- [37]. Bernard M. C., Hugot-Le Goff A. Raman spectroscopy for the study of polyaniline // *Synth. Met.* – 1997. – Т. 85, № 1–3. – С. 1145–1146.
- [38]. Bernard M. C., Hugot-Le Goff A. Quantitative characterization of polyaniline films using Raman spectroscopy: I: Polaron lattice and bipolaron // *Electrochim. Acta.* – 2006. – Т. 52, № 2. – С. 595–603.
- [39]. Mažeikienė R., Niaura G., Malinauskas A. A comparative multiwavelength Raman spectroelectrochemical study of polyaniline: A review // *J. Solid State Electrochem.* – 2019. – Т. 23. – С. 1631–1640.
- [40]. Jabor A. A. et al. Preparation poly 4-bromoaniline thin films by electro deposition technique for hydrogen gas sensor // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2018. – Т. 1032, № 1. – С. 012063.
- [41]. Mohammadabadi S. Z., Zanganeh A. R. Electrochemically Generated Recognition Sites in Self-doped Polyaniline Modified Electrodes for Voltammetric and Potentiometric Determination of Copper (II) Ion // *Electroanalysis.* – 2018. – Т. 30, № 3. – С. 415–425.
- [42]. Roy A. et al. Polyaniline-multiwalled carbon nanotube (PANI-MWCNT): Room temperature resistive carbon monoxide (CO) sensor // *Synth. Met.* – 2018. – Т. 245. – С. 182–189.
- [43]. Sonker R. K., Yadav B. C., Dzhardimalieva G. I. Preparation and properties of nanostructured PANI thin film and its application as low temperature NO₂ sensor // *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* – 2016. – Т. 26. – С. 1428–1433.
- [44]. Umar A. et al. Enhanced NO₂ gas sensor device based on supramolecularly assembled polyaniline/silver oxide/graphene oxide composites // *Ceram. Int.* – 2021. – Т. 47, № 18. – С. 25696–25707.
- [45]. Nasresfahani S. et al. Improvement of the carbon monoxide gas sensing properties of polyaniline in the presence of gold nanoparticles at room temperature // *Synth. Met.* – 2020. – Т. 265. – С. 116404.
- [46]. Jain S. et al. Development of Ni doped ZnO/polyaniline nanocomposites as high response room temperature NO₂ sensor // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2019. – Т. 247. – С. 114381.
- [47]. Yan X. B. et al. NO₂ gas sensing with polyaniline nanofibers synthesized by a facile aqueous/organic interfacial polymerization // *Sens. Actuators B Chem.* – 2007. – Т. 123, № 1. – С. 107–113.

References

- [1]. A. Kobald, U. Weimar, N. Barsan, Towards Understanding Temperature Modulated Smox Gas Sensor Arrays for Outdoor Air Quality Applications, *Sens. Actuators B Chem.*, 440 (2025) 137879. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.137879>
- [2]. K. Kohse-Höinghaus, Combustion, chemistry, and carbon neutrality, *Chem. Rev.*, 123 (2023) 5139–5219. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00828>
- [3]. S. Dhall, B.R. Mehta, A.K. Tyagi, K. Sood, A review on environmental gas sensors: Materials and technologies, *Sens. Int.*, 2 (2021) 100116. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100116>
- [4]. В.Я. Штерн, Механизм окисления углеводов в газовой фазе, М., Изд-во АН СССР, 1960, 302 с.
- [5]. H. Böhm, D. Hesse, H. Jander, B. Lüers, J. Pietscher,

- H.G.G. Wagner, M. Weiss, The influence of pressure and temperature on soot formation in premixed flames, *Symp. (Int.) Combust.*, 22 (1989) 403–411. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(89\)80047-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(89)80047-5)
- [6]. M. Nazhipkyzy, Z. Mansurov, Super hydrophobic materials and coatings: overview, *Combust. Plasma Chem.*, 18 (2020) 163–189. <https://doi.org/10.18321/cpc393>
- [7]. Z.A. Mansurov, N.G. Prikhodko, A.V. Savelev, *Obrazovanie PTSU, fullerene, uglerodnykh nanotrubok i sazi v protsessakh goreniya*, Алматы, КазНУ, 2012, 383 с.
- [8]. Z.A. Mansurov, Producing nanomaterials in combustion. *Combust. Explos. Shock Waves*, 48 (2012) 561–569. <https://doi.org/10.1134/S0010508212050073>
- [9]. Z.A. Mansurov, N.G. Prikhodko, M. Auyelkhankyzy, B.T. Lesbayev, M. Nazhipkyzy, Synthesis of single and few layer graphenes in flames, *Proc. Eur. Combust.*, 1 (2015) 1.
- [10]. Z.A. Mansurov, Soot formation, Almaty, Kazak University, 2015, 167.
- [11]. Q. Wu, Z. Ding, W. Zhang, Research progress on electrochemical gas sensors for fire detection, *Int. J. Electrochem. Sci.*, (2025) 101043. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2025.101043>
- [12]. P. Chesler, C. Hornoïu, MOX-based resistive gas sensors with different types of sensitive materials (powders, pellets, films), used in environmental chemistry, *Chemosensors*, 11 (2023) 95. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11020095>
- [13]. X. Liu, W. Zheng, R. Kumar, M. Kumar, J. Zhang, Conducting polymer-based nanostructures for gas sensors, *Coord. Chem. Rev.*, 462 (2022) 214517. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214517>
- [14]. M.A. Farea, H.Y. Mohammed, S.M. Shirsat, P.W. Sayyad, N.N. Ingle, T. Al-Gahouari, M.D. Shirsat, Hazardous gases sensors based on conducting polymer composites, *Chem. Phys. Lett.*, 776 (2021) 138703. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138703>
- [15]. C.S. Park, D.Y. Kim, E.Y. Jung, H.J. Jang, G.T. Bae, J.Y. Kim, H.S. Tae, Ultrafast room temperature synthesis of porous polythiophene via atmospheric pressure plasma polymerization technique and its application to NO₂ gas sensors, *Polymers*, 13 (2021) 1783. <https://doi.org/10.3390/polym13111783>
- [16]. H. Sustkova, J. Voves, Modeling a multiple-chain emeraldine gas sensor for NH₃ and NO₂ detection, *Beilstein J. Nanotechnol.*, 13 (2022) 721–729. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.64>
- [17]. J. Kroutil, A. Laposa, V. Povolny, L. Klimsa, M. Husak, Gas sensor with different morphology of PANI layer, *Sensors*, 23 (2023) 1106. <https://doi.org/10.3390/s23031106>
- [18]. C.H. Srinivas, D. Srinivasu, B. Kavitha, N. Narsimlu, K.S. Kumar, Synthesis and characterization of nano size conducting polyaniline, *IOSR J. Appl. Phys.*, 1 (2012) 12–15. <https://doi.org/10.9790/4861-0151215>
- [19]. J. Kroutil, A. Laposa, A. Ahmad, J. Voves, V. Povolny, L. Klimsa, M. Husak, A chemiresistive sensor array based on polyaniline nanocomposites and machine learning classification, *Beilstein J. Nanotechnol.*, 13 (2022) 411–423. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.34>
- [20]. M. Kumar, S. Sharma, R. Pal, B. Vidhani, A novel gas sensor based on activated charcoal and polyaniline composites for selective sensing of methanol vapors, *Sens. Actuators A Phys.*, 353 (2023) 114210. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114210>
- [21]. S. Abdulla, T.L. Mathew, B. Pullithadathil, Highly sensitive, room temperature gas sensor based on polyaniline-multiwalled carbon nanotubes (PANI/MWCNTs) nanocomposite for trace-level ammonia detection, *Sens. Actuators B Chem.*, 221 (2015) 1523–1534. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.08.002>
- [22]. S. Navazani, A. Shokuhfar, M. Hassanisadi, A. Di Carlo, N. Shahcheraghi, Fabrication and characterization of a sensitive, room temperature methane sensor based on SnO₂@reduced graphene oxide-polyaniline ternary nanohybrid, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 88 (2018) 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.08.006>
- [23]. R. Kashyap, R. Kumar, M. Kumar, S. Tyagi, D. Kumar, Polyaniline nanofibers based gas sensor for detection of volatile organic compounds at room temperature, *Mater. Res. Express*, 6 (2019) 1150d3. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4e43>
- [24]. G. Gaikwad, P. Patil, D. Patil, J. Naik, Synthesis and evaluation of gas sensing properties of PANI based graphene oxide nanocomposites, *Mater. Sci. Eng. B*, 218 (2017) 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.01.008>
- [25]. X. Tian, X. Cui, Y. Xiao, T. Chen, X. Xiao, Y. Wang, Pt/MoS₂/polyaniline nanocomposite as a highly effective room temperature flexible gas sensor for ammonia detection, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15 (2023) 9604–9617. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c20299>
- [26]. D. Han, Y. Wang, Y. Wang, Q. Duan, D. Li, Y. Ge, S. Sang, Machine-learning-assisted n-GaN-Au/

- PANI gas sensor array for intelligent and ultra-accurate ammonia recognition, *Chem. Eng. J.*, 495 (2024) 153705. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153705>
- [27]. Q. Feng, H. Zhang, Y. Shi, X. Yu, G. Lan, Preparation and gas sensing properties of PANI/SnO₂ hybrid material, *Polymers*, 13 (2021) 1360. <https://doi.org/10.3390/polym13091360>
- [28]. R. Kumar, H. Rahman, S. Ranwa, A. Kumar, G. Kumar, Development of cost effective metal oxide semiconductor based gas sensor over flexible chitosan/PVP blended polymeric substrate, *Carbohydr. Polym.*, 239 (2020) 116213. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116213>
- [29]. C.M. Masemola, N. Moloto, Z. Tetana, L.Z. Linganiso, T.E. Motaung, E.C. Linganiso-Dziike, Advances in polyaniline-based composites for room-temperature chemiresistor gas sensors, *Processes*, 13 (2025) 401. <https://doi.org/10.3390/pr13020401>
- [30]. S. Budi, A. Juliana, U. Cahyana, A. Purwanto, A. Imaduddin, E. Handoko, Preparation of high surface area and high conductivity polyaniline nanoparticles using chemical oxidation polymerization technique, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 983 (2018) 012162. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/983/1/012162>
- [31]. Q. Sun, M.C. Park, Y. Deng, Studies on one-dimensional polyaniline (PANI) nanostructures and the morphological evolution, *Mater. Chem. Phys.*, 110 (2008) 276–279. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.02.014>
- [32]. J. Wang, J. Wang, Z. Yang, Z. Wang, F. Zhang, S. Wang, A novel strategy for the synthesis of polyaniline nanostructures with controlled morphology, *React. Funct. Polym.*, 68 (2008) 1435–1440. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2008.07.002>
- [33]. Z.A. Boeva, V.G. Sergeyev, Polyaniline: synthesis, properties, and application, *Polym. Sci. Ser. C*, 56 (2014) 144–153. <https://doi.org/10.1134/S1811238214010032>
- [34]. W. Wang, Vapor phase infiltration (VPI) and doping of conducting polymers, *Diss., Univ. País Vasco*, 2017
- [35]. Y. Wanna, N. Srisukhumbowornchai, A. Tuantranont, A. Wisitsoraat, N. Thavarungkul, P. Singjai, The effect of carbon nanotube dispersion on CO gas sensing characteristics of polyaniline gas sensor, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 6 (2006) 3893–3896. <https://doi.org/10.1166/jnn.2006.675>
- [36]. J. Huang, S. Virji, B.H. Weiller, R.B. Kaner, Polyaniline nanofibers: facile synthesis and chemical sensors, *J. Am. Chem. Soc.*, 125 (2003) 314–315. <https://doi.org/10.1021/ja028371y>
- [37]. M.C. Bernard, A. Hugot-Le Goff, Raman spectroscopy for the study of polyaniline, *Synth. Met.*, 85 (1997) 1145–1146. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(97\)80187-7](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(97)80187-7)
- [38]. M.C. Bernard, A. Hugot-Le Goff, Quantitative characterization of polyaniline films using Raman spectroscopy: I: Polaron lattice and bipolaron, *Electrochim. Acta*, 52 (2006) 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.05.039>
- [39]. R. Mažeikienė, G. Niaura, A. Malinauskas, A comparative multiwavelength Raman spectroelectrochemical study of polyaniline: a review, *J. Solid State Electrochem.*, 23 (2019) 1631–1640. <https://doi.org/10.1007/s10008-019-04289-3>
- [40]. A.A. Jabor, A.M. Farhan, A.H.K. Elttayef, A.A. Jabor, Preparation poly 4-bromoaniline thin films by electro deposition technique for hydrogen gas sensor, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1032 (2018) 012063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1032/1/012063>
- [41]. S.Z. Mohammadabadi, A.R. Zanganeh, Electrochemically generated recognition sites in self-doped polyaniline modified electrodes for voltammetric and potentiometric determination of copper (II) ion, *Electroanalysis*, 30 (2018) 415–425. <https://doi.org/10.1002/elan.201700496>
- [42]. A. Roy, A. Ray, P. Sadhukhan, K. Naskar, G. Lal, R. Bhar, S. Das, Polyaniline-multiwalled carbon nanotube (PANI-MWCNT): room temperature resistive carbon monoxide (CO) sensor, *Synth. Met.*, 245 (2018) 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2018.08.024>
- [43]. R.K. Sonker, B.C. Yadav, G.I. Dzhardimalieva, Preparation and properties of nanostructured PANI thin film and its application as low temperature NO₂ sensor, *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, 26 (2016) 1428–1433. <https://doi.org/10.1007/s10904-016-0439-y>
- [44]. A. Umar, A.A. Ibrahim, H. Algadi, H. Albargi, M.A. Alsairi, Y. Wang, S. Akbar, Enhanced NO₂ gas sensor device based on supramolecularly assembled polyaniline/silver oxide/graphene oxide composites, *Ceram. Int.*, 47 (2021) 25696–25707. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.296>
- [45]. S. Nasresfahani, Z. Zargarpour, M.H. Sheikhi, S.N. Ana, Improvement of the carbon monoxide gas sensing properties of polyaniline in the presence of gold nanoparticles at room temperature, *Synth. Met.*, 265 (2020) 116404. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116404>

- [46]. S. Jain, N. Karmakar, A. Shah, N.G. Shimpi, Development of Ni doped ZnO/polyaniline nanocomposites as high response room temperature NO₂ sensor, Mater. Sci. Eng. B, 247 (2019) 114381. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.114381>
- [47]. X.B. Yan, Z.J. Han, Y. Yang, B.K. Tay, NO₂ gas sensing with polyaniline nanofibers synthesized by a facile aqueous/organic interfacial polymerization, Sens. Actuators B, 123 (2007) 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.07.031>

Gas-sensitive sensors based on polyaniline for monitoring CO, CH₄ and NO₂ at room temperature

A.A. Imash^{1,2}, R.B. Kazhdanbekov^{1,2*},
G.T. Smagulova^{2,3}, Z.A. Mansurov^{1,2}

¹Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi ave, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay Batyr str., Almaty, Kazakhstan

³Abai Kazakh National Pedagogical University, 13, Dostyk ave., Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

This study is dedicated to the 60th anniversary of Professor Bakhytzhon Tastanovich Lesbaev—a leading expert in the fields of combustion, nanomaterials, and functional carbon systems, who has made a significant contribution to the advancement of interdisciplinary research at the intersection of nanotechnology, energy, and environmental science. As industrial growth accelerates and hydrocarbon fuel usage expands, developing advanced sensor materials for tracking toxic emissions from incomplete combustion has become increasingly critical. Among the most hazardous byproducts of hydrocarbon fuel combustion are carbon monoxide (CO), methane (CH₄), and nitrogen dioxide (NO₂). These compounds exhibit high toxicity: carbon monoxide causes hypoxia, methane contributes to the greenhouse effect, and nitrogen dioxide irritates the respiratory tract and participates in the formation of photochemical smog. Moreover, they promote the generation of secondary pollutants, including ozone and fine particulate matter. This work investigates the potential of polymerized polyaniline (PANI) as a gas-sensitive material capable of selectively detecting these gases at room temperature. Experimental

data are presented on the response of a PANI-based sensing layer – synthesized via chemical oxidative polymerization – when exposed to both reducing and oxidizing gases. The mechanisms of interaction are analyzed, including doping, charge transfer, and the influence of morphological parameters on sensor response. Key factors affecting sensitivity, selectivity, reproducibility, and operational stability are identified. The obtained results confirm the high efficiency of polyaniline as an active sensing material and substantiate its use in flexible, energy-efficient sensing platforms aimed at environmental monitoring and combustion process optimization with minimized harmful emissions.

Keywords: gas sensors, polyaniline, gas monitoring, nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), methane (CH₄).

Бөлме температурасында CO, CH₄ және NO₂ бақылауға арналған полианилин негізіндегі газға сезімтал сенсорлар

Ә.А. Имаш^{1,2}, Р.Б. Кажданбеков^{1,2*},
Г.Т. Смагулова^{2,3}, З.А. Мансуров^{1,2}

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

²Жану проблемалары институты, к. Бөгенбай батыр, 172 Алматы, Қазақстан

³Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Достық даңғылы, 13, Алматы, Қазақстан

АҢДАТПА

Бұл жұмыс жану, наноматериалдар және функционалдық көміртекті жүйелер саласындағы жетекші маман, нанотехнология, энергетика және экология тоғысындағы пәнаралық зерттеулердің дамуына елеулі үлес қосқан профессор Бахытжан Тастанович Лесбаевтың 60 жылдық мерейтойына арналған. Индустрияның қарқынды дамуы және көмірсутекті отынды пайдалану көлемінің артуы жағдайында толық емес жану кезінде бөлінетін улы газдарды бақылауға арналған тиімді сенсорлық материалдарды әзірлеу өзекті мәселеге айналып отыр. Көмірсутекті отынның толық жанбауы нәтижесінде түзілетін ең қауіпті қосылыстар қатарына көміртек тотығы (CO), метан (CH₄) және азот диоксиді (NO₂) жатады. Бұл қосылыстар жоғары ұяттылығымен ерекшеленеді: көмір-

тек тотығы гипоксияға әкеледі, метан парниктік әсерді күшейтеді, ал азот диоксиді тыныс алу жолдарын тітіркендіріп, фотохимиялық тұмандардың түзілуіне қатысады. Сонымен қатар, бұл газдар озон мен ұсақ дисперсті аэрозольдер сияқты екінші реттік ластаушы заттардың түзілуіне ықпал етеді. Аталған жұмыста бөлме температурасында көрсетілген газдарды селективті анықтай алатын газсезгіш материал ретінде полимерленген полианилиннің (ПАНИ) әлеуеті зерттелді. Химиялық тотықтырып полимерлеу әдісімен алынған ПАНИ сезгіш қабатына қалпына келтіргіш және тотықтырғыш газдардың әсері кезінде алынған эксперименттік деректер ұсынылған. Өзара әрекеттесу механизмдері, соның ішінде допирлеу, заряд тасымалдау және морфологиялық параметрлердің сенсорлық жауапқа әсері талданды. Сенсордың сезімталдығына, селективтілігіне, қайталанғыштығына және тұрақтылығына әсер ететін негізгі факторлар анықталды. Алынған нәтижелер полианилиннің тиімді газсезгіш материал ретіндегі жоғары тиімділігін көрсетіп, оны зиянды шығарындыларды барынша азайтуға бағытталған экологиялық мониторинг пен жану үдерістерін оңтайландыруға арналған икемді, энергия үнемдейтін сенсорлық платформалар құрамында қолданудың негізділігін дәлелдейді.

Түйінді сөздер: газға сезімтал сенсорлар, полианилин, газ мониторингі, азот диоксиді (NO_2), көміртек оксиді (CO), метан (CH_4).

Сведения об авторах

А.А. Имаш — магистр, младший научный сотрудник лаборатории функциональных наноматериалов Института проблем горения
E-mail: iimash.aigerim@gmail.com
ORCID 0000-0003-3792-6512

Р.Б. Кажданбеков — бакалавр, КазНУ им. аль-Фараби
E-mail: kazhdanbekov.ramazan@gmail.com
ORCID 0009-0004-5017-4049

Г.Т. Смагулова — PhD, ведущий научный сотрудник лаборатории функциональных наноматериалов Института проблем горения
E-mail: smagulova.gaukhar@gmail.com
ORCID 0000-0002-2943-5222

З.А. Мансуров — доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник, научный руководитель Института проблем горения
E-mail: zmansurov@kaznu.kz
ORCID 0000-0002-8956-216X