

АННОТАЦИЯ

к диссертационной работы на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе «8D06201 – Радиотехника, электроника и
телекоммуникации»

ТІЛЕУ АЯН ОРАЗБАЙҰЛЫ

КОНЦЕНТРАЦИОННОЕ НАСЫЩЕНИЕ СИГНАЛА ЛАЗЕРНОГО ГАЗОВОГО ДАТЧИКА

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена исследованию особенностей функционирования газосенсорных систем, основанных на лазерном абсорбционном методе. В работе экспериментально и теоретически рассмотрены механизмы формирования сигнала лазерного газового сенсора, его флуктуационные свойства и явление концентрационного насыщения при изменении концентрации метана, этанола и аммиака. В ходе исследования проанализированы оптические процессы, возникающие в результате взаимодействия лазерного излучения с молекулами газа в замкнутой газовой ячейке, а также электрический сигнал, регистрируемый фотодетектором после прохождения излучения через газовую среду. Определены линейные и нелинейные режимы зависимости сигнала сенсора от концентрации газа, а также условия перехода в область насыщения. Взаимосвязь между интенсивностью поглощения лазерного излучения и тепловым движением молекул газа при увеличении концентрации описана с использованием флуктуационно-диссипационного соотношения и корреляционных функций. Кроме того, для оценки информационных свойств сигнала сенсора применялись методы, основанные на энтропии Шеннона. Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации рабочего диапазона лазерных газовых сенсоров, корректного выбора линейной области работы сенсора, а также надежного определения концентрации и типа газа.

Актуальность исследования. На современном этапе стремительное развитие промышленных технологий, усиление требований к экологической безопасности и актуальность вопросов охраны здоровья человека существенно повышают спрос на сенсорные системы, обеспечивающие непрерывный и высокоточный контроль состава газовой среды. Особенно важным для промышленной безопасности, экологического мониторинга, энергетики и жилищно-коммунального сектора является оперативное обнаружение малых концентраций горючих, токсичных и опасных газов.

В настоящее время для анализа состава газовой среды применяются сенсоры, основанные на различных принципах действия. Среди них лазерные газовые сенсоры выделяются высокой чувствительностью, возможностью бесконтактного измерения и селективностью к определённому виду газа. Поскольку лазерные методы основаны на особенностях поглощения излучения

молекулами газа, они обеспечивают высокую точность и надёжность результатов измерений. Однако при увеличении концентрации газа сигнал лазерного сенсора переходит из линейного режима в нелинейный, что сопровождается возникновением явления насыщения и приводит к существенным ограничениям точности измерений.

Концентрационное насыщение сигнала сенсора связано со сложными флуктуационными и нелинейными процессами взаимодействия молекул газа с лазерным излучением. Понимание физических механизмов данного явления, определение порогов насыщения и корректный выбор рабочего диапазона сенсора для различных газов представляют собой важную научно-техническую задачу в области практического применения лазерных газовых сенсоров. Особую актуальность представляет исследование особенностей насыщения сигнала сенсора для таких широко распространённых в промышленности и быту газов, как метан, этанол и аммиак.

С ростом концентрации газа изменяются интенсивность поглощения лазерного излучения, флуктуации сигнала, регистрируемого фотодетектором, а также их корреляционные свойства. Анализ этих изменений с использованием флуктуационно-диссипационного соотношения, корреляционных функций и информационно-энтропийных методов позволяет глубже понять закономерности формирования сигнала сенсора. Кроме того, применение универсальных функциональных зависимостей, основанных на масштабной инвариантности, открывает новые подходы к оценке концентраций насыщения сигнала сенсора.

Таким образом, исследование механизмов концентрационного насыщения сигналов лазерных газовых сенсоров, определение их флуктуационных и информационных характеристик, а также установление порогов насыщения для различных газов являются важной и актуальной научной задачей с точки зрения развития современных сенсорных систем, предназначенных для точного определения концентрации газов.

Цель исследования. Экспериментальное и теоретическое исследование механизмов концентрационно-зависимого насыщения сигналов газовых сенсоров, основанных на лазерном абсорбционном методе, определение порогов насыщения сигнала сенсора для метана, этанола и аммиака, а также описание линейных и нелинейных режимов работы сенсора с использованием флуктуационно-диссипационных и информационно-энтропийных методов.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать экспериментальную газосенсорную систему, основанную на лазерном абсорбционном методе, и провести измерения в замкнутой газовой ячейке с использованием метана, этанола и аммиака;
2. Получить временные ряды сигналов лазерного сенсора, регистрируемых фотодетектором при изменении концентрации газа, и осуществить их цифровую регистрацию;

3. Проанализировать линейные и нелинейные режимы работы сигнала сенсора с использованием флуктуационно-диссипационного соотношения и информационно-энтропийных методов.

Методы исследования. В работе использованы методы лазерных абсорбционных измерений, цифровой регистрации и обработки сигналов фотодетектора, флуктуационно-диссипационного, корреляционного и информационно-энтропийного анализа, а также экспериментальные и аналитические методы исследования.

Объекты исследования. Наноразмерный пористый кремний, CuO/пористый кремний, источник лазерного излучения, газовая ячейка, фотодетектор и система цифровой регистрации.

Предмет исследования. Изменение сигнала лазерного газового сенсора в зависимости от концентрации газа, а также его флуктуационные, корреляционные и информационные характеристики.

Научная новизна и особенности работы. Впервые:

1. Физический механизм концентрационного насыщения сигнала лазерного газового сенсора комплексно исследован с точки зрения флуктуационных процессов, возникающих в результате взаимодействия фотонов с молекулами газа.

2. Для метана, этанола и аммиака экспериментально определены концентрации насыщения сигнала лазерного сенсора и показана их связь с флуктуационно-диссипационными и информационными характеристиками.

3. В режиме насыщения сигнала сенсора впервые проведён сравнительный анализ поведения корреляционных функций и энтропии Шеннона, а также предложены информационные критерии для разделения линейных и нелинейных областей работы сенсора.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Наноструктурный сенсор на основе CuO/PS по характеристикам газовой чувствительности в условиях постоянного напряжения демонстрирует увеличение величины тока на 20% в течение 1–3 минут.

2. Концентрационное насыщение сигнала лазерного сенсора для различных газов определяется флуктуационно–диссипационной теоремой. При этом значения концентрации насыщения для различных газов составляют: $C_*(NH_3) = 10^2$ ppm, $C_*(C_2H_5OH) = 10^3$ ppm, $C_*(CH_4) = 10^4$ ppm.

3. Самоподобная информация $I_*=0.567$ и самоподобная энтропия $H_*=0.806$ определяют коэффициент когерентности сигнала лазерного газового сенсора: $\eta = (H_* - I_*)/(H_* + I_*) \approx 0,174$.

Теоретическая значимость исследования. Полученные в диссертационной работе результаты направлены на объяснение физической природы явления концентрационно-зависимого насыщения сигналов газовых сенсоров, основанных на лазерном абсорбционном методе. Анализ процесса взаимодействия молекул газа с лазерным излучением с позиций флуктуационно-диссипационного и информационно-энтропийного подходов позволяет теоретически описать линейные и нелинейные режимы работы сигнала сенсора.

Полученные теоретические выводы могут служить основой для дальнейшего развития моделей исследования флуктуационных и корреляционных свойств сигналов лазерных газовых сенсоров.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы определяется возможностью оптимизации рабочего диапазона лазерных газовых сенсоров и совершенствования алгоритмов измерения с учетом режима концентрационного насыщения сигнала. Экспериментально определённые концентрации насыщения могут быть использованы при проектировании сенсорных систем для высокоточного обнаружения метана, этанола и аммиака. Полученные результаты направлены на повышение точности и обеспечение надежности лазерных газовых сенсоров, применяемых в системах экологического мониторинга, промышленной безопасности, энергетики и контроля газовой среды.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются наличием публикаций в изданиях, рекомендованных КОКНВО МНВО РК, в журналах, входящих в международные информационные базы данных Web of Science (Clarivate Analytics, США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды), а также публикациями в материалах международных научных конференций и соответствием полученных результатов данным других авторов.

Личный вклад автора. Автором в полном объеме выполнены все этапы диссертационного исследования. Автором самостоятельно осуществлены разработка экспериментальной газосенсорной системы на основе лазерного абсорбционного метода, проведение измерений с использованием метана, этанола и аммиака в замкнутой газовой ячейке, получение временных рядов сигналов сенсора, регистрируемых фотодетектором, а также их цифровая регистрация.

Анализ флуктуационных, корреляционных и информационно-энтропийных характеристик сигнала сенсора, определение линейных и нелинейных режимов, зависящих от концентрации, а также оценка порогов насыщения сигнала выполнены при непосредственном участии автора. Обработка, интерпретация и обобщение результатов исследования проведены автором.

Уточнение цели и задач работы, утверждение плана исследования и обсуждение полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы опубликованы в следующих источниках:

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в международные научные базы данных Thomson Reuters и Scopus:

1. Khaniyev B., Ibraimov M., Nalibayev E., Skabylov A., Khaniyeva A., Jianxi L., Tezekbay Y., Duisebayev T., **Tileu A.**, Meirambekuly N. Development of cupric oxide/porous silicon (CuO/PS) heterostructure enabled room temperature methane sensor for enhanced industrial safety // Engineered Science. – 2024, 31, 1268. **Scopus: CiteScore 12.5, Percentile 96%. Q1.** <http://dx.doi.org/10.30919/es1268>

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:

1. Zhanabaev Z., Akhtanov S., Tileu A., Almen D. Coherent amplitude modulation in a laser gas sensor // Eurasian Physical Technical Journal. – 2023, 20(4-46), страницы 111–115. **Scopus: CiteScore 1.2, Percentile 26%. Q3.**

<https://doi.org/10.31489/2023No4/111-115>

2. Zhanabaev Z., Tileu A., Duisebayev T., Almen D. Saturation of gas concentration signal of the laser gas sensor // Eurasian Physical Technical Journal 2024. Vol 21 №. 3 (49). P. 71-80. **Scopus: CiteScore 1.2, Percentile 26%. Q3.**

<https://doi.org/10.31489/2024No3/71-80>

Публикации в сборниках тезисов международных научных конференций:

1. Тілеу А.О. Лазерлік сенсормен газ түрін ажырату // An international scientific conference of students and young scientists «FARABI ALEMI». – 2023. – С.187.

2. Тілеу А.О., Ахметова М.А. Лазерлік газ сенсорындағы төмен жиілікті флуктуациялық сигналдар үшін аллан дисперсиянын анықтау // An international scientific conference of students and young scientists «FARABI ALEMI». – 2024. – С. 207.

3. Тілеу А.О., Сазбай Ә.М. Лазерлік газ сенсорының сигналының когеренттілігі // An international scientific conference of students and young scientists «FARABI ALEMI». – 2025. – С.223

Авторское свидетельство:

1. Жанабаев З.Ж., Ибраимов М.К., Ахтанов С.Н., Ханиев Б.А., Тілеу А.О., Намазбаев Т.А., Мейрамбекұлы Н., Дуйсебаев Т.С. Лазерлік газ сенсоры сигналының модуляция когеренттігіне арналған құрылғы // Пайдалы модельге патент, 2025. № 9374.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Работа содержит 63 рисунок, 56 формулы, 1 таблицу, список литературы из 92 наименований и изложена на 100 страницах.