



Optical Gas Sensor for Industrial Applications

Halina BOHDAN, Mykhailo HLUSHCHENKO, Anatolij PROTASOV,
Oleksandr MURAVIOV

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
e-mail: bogdangalya@gmail.com, mglsh@ukr.net

Abstract

The purpose of this work is to develop an optical sensor for measuring the concentration of carbon monoxide in the air of industrial enterprises, which implements the method of laser absorption spectrometry and has a high sensitivity. A feature of this sensor is the use of two radiation receivers in the design, which register different wavelengths. The achieved resolution of the sensor when determining the CO concentration is 3 ppm.

Keywords: carbon monoxide, laser absorption spectrometry, gas sensor.

Оптический датчик угарного газа для промышленности

Галина БОГДАН, Михаил ГЛУЩЕНКО, Анатолий ПРОТАСОВ,
Александр МУРАВЬОВ

1. Введение

Монооксид углерода (угарный газ) CO – это газ, который не имеет запаха, цвета и вкуса, обычно присутствует в атмосфере в низких концентрациях (0,03-0,20 частей на миллион). Увеличение концентрации CO в воздухе непосредственно связано с активной деятельностью промышленных предприятий, из-за больших объемов сжигания природного газа (метана или пропана), что является основным источником образования угарного газа. Как показывают статистические данные [1-2] совокупная заболеваемость и смертность от отравления CO в 2017 году по всему миру составили 137 случаев на миллион и 4,6 смертей на миллион соответственно. Сильная токсичность монооксида углерода для человека вызвана его высокой скоростью взаимодействием с гемоглобином (примерно в десять раз выше скорости присоединения кислорода), и низкой скоростью диссоциации (расщепления) образованного химического соединения карбоксигемоглобина [1]. Увеличении концентрации CO в окружающем воздухе до 1,28% приводит к смерти человека в течении 1-3 минут, но даже небольшие дозы угарного газа приводят к неприятным последствиям для организма: тошнота, усталость, головная боль, потеря сознания. Кроме того, значительное количество людей, переживших отравление CO, страдают длительными неврологическими и аффективными осложнениями [3]. Кроме нанесения вреда организму человека, соединение угарного газа с гидроксидом (ОН) в воздухе, вызывая глобальное потепление [4]. Поэтому важной задачей является разработка чувствительных надежных и недорогих датчиков CO для автоматизированных систем мониторинга качества воздуха на промышленных предприятиях.

Для измерения содержания CO в воздухе промышленных предприятий используют различные методы [5-6], такие как: инфракрасная спектроскопия, вакуумная ультрафиолетовая резонансная флуоресценция, диодно лазерная абсорбционная

спектроскопия, инфракрасное поглощение с Фурье-преобразованием по замкнутому пути, газовая хроматография в сочетании с детектором на основе оксида ртути или пламенно-ионизационным детектором, фотометрические методы и др.

В последнее время, при разработке датчиков CO все шире начинают применять оптические методы лазерной абсорбционной спектроскопии (ЛАС) [7-10]. Данный метод абсорбционной спектроскопии, использует лазер в качестве источника света и измеряет концентрацию CO в воздухе на основе обнаружения изменения интенсивности лазерного луча после прохождения вдоль оптического пути. Метод ЛАС один из наиболее чувствительных для определения концентрации химических веществ в газовой фазе, поскольку почти каждая молекула имеет уникальный спектроскопический отпечаток в инфракрасной области спектра [8]. К преимуществам данного метода относят: возможность определять концентрацию CO в воздухе бесконтактным методом, быстрое время отклика, высокая чувствительность и избирательность, не требует калибровки, простота в обслуживании, длительное время работы. Датчики, принцип работы которых основан на методе ЛАС, хорошо совместимы с автоматизированными системами мониторинга воздуха на промышленных предприятиях, которые снимают показания в реальном времени.

Целью данной работы, является разработка оптического датчика, для измерения концентрации монооксида углерода в воздухе промышленных предприятий, который реализует метод лазерной абсорбционной спектроскопии и обладает высокой чувствительностью.

2. Конструкция датчика угарного газа

Конструкция разработанного датчика для определения концентрации угарного газа показана на Рис. 1

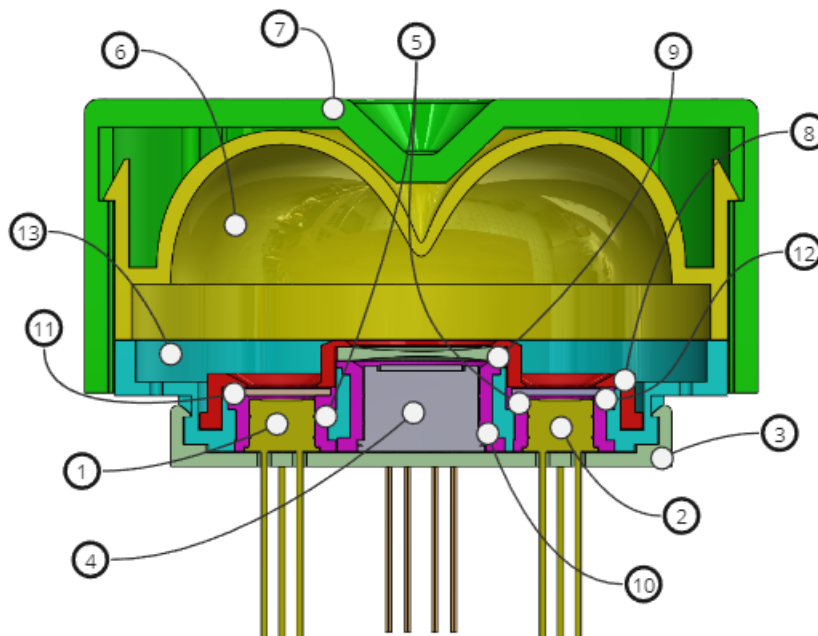


Рис. 1. Конструкция оптического датчика для определения концентрации CO в воздухе: 1, 2 – приемники излучения; 3 – фиксатор активных оптических элементов; 4 – излучатель; 5 – силиконовая прокладка для приемника; 6 – зеркало; 7 – защитный корпус; 8 – фиксатор пассивных оптических элементов; 9 – рассеивающая линза; 10 – силиконовая прокладка для излучателя; 11 – полосовой фильтр, 2000 нм; 12 – полосовой фильтр, 2300 нм; 13 – корпус

Процесс работы датчика следующий: излучатель (4) генерирует излучение с длиной волны, которая соответствует абсорбции угарного газа (Рис. 2). Это излучение проходит через воздушную среду внутри датчика, которая идентична воздуху в месте контроля. Выбор длины волны, для спектроскопического датчика угарного газа, основан на абсорбционных свойствах СО, способности к чувствительному обнаружению и надежному измерению, а также техническим возможностям для работы с этой длиной волны. Для улучшения технических характеристик датчика предпочтительней работать на длине волны 4,5 – 5 нм (Рис. 2), где свойства поглощения излучения угарным газом выше, но в связи с высокой стоимостью излучателей, способных генерировать такие сигналы, была выбрана длина волны 2300 нм.

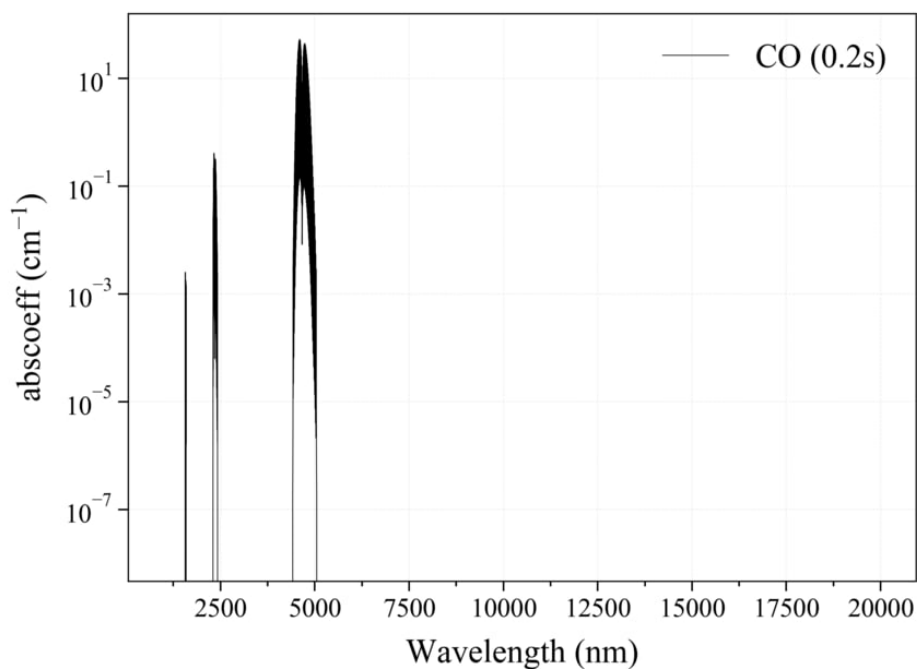


Рис. 2. Типовые длины волн для обнаружения монооксида углерода

Приемники излучения (1,2) принимают сигнал, прошедший через воздушную среду внутри измерительной камеры датчика. Первый приемник излучения (1), является основным, прикрыт полосовым оптическим фильтром, пропускающим излучение с длиной волны 2300 нм (12), измеряет интенсивность сигнала, проходящего через воздушную среду. Если монооксид углерода присутствует в исследуемой воздушной среде, то происходит процесс абсорбции некоторой части излученного сигнала, что приводит к понижению его интенсивности. Основной приемопередатчик регистрирует уменьшение интенсивности излучения и передает эту информацию для дальнейшего анализа.

Второй приемник (2) является референсным и также прикрыт полосовым оптическим фильтром, настроенным на длину волны 2000 нм (11) (длина волны излучения которое не поглощается угарным газом). Его главная функция заключается в измерении начального уровня интенсивности излученного сигнала. Он служит для компенсации влияния изменений интенсивности света, которые могут возникнуть в результате факторов, не связанных с присутствием угарного газа (например, изменения в источнике света или оптических свойств воздушной среды).

С помощью референсного приемника датчик может компенсировать изменения в базовом уровне излученного сигнала, что позволяет более точно определить уменьшение

интенсивности, вызванное угарным газом. По аналогии, измеренные значения основного приемника можно откалибровать и корректировать в зависимости от значений референсного приемника.

Силиконовые прокладки (5, 10) предназначены: для отвода тепла выделяющегося при работе излучателя; обеспечения герметичности системы, что позволяет защитить компоненты датчика от попадания влаги и тем самым уменьшить количество ложных срабатываний; компенсации неточности изготовления элементов датчика.

Предложенная форма зеркала (6) увеличивает равномерность рассеивания излучения внутри измерительной камеры датчика.

3. Результаты моделирования

Для определения технических возможностей разработанного датчика было проведено моделирование в среде Ansys SPEOS (Рис. 3).

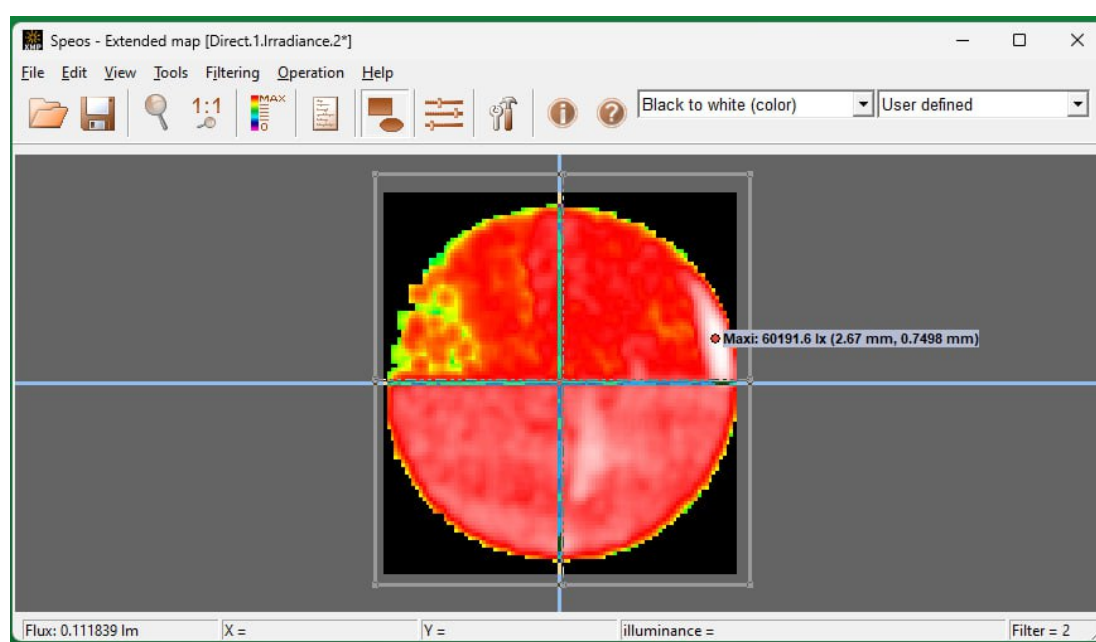


Рис. 2. Моделирование работы датчика в среде Ansys SPEOS при наличии в воздухе CO

В процессе моделирование были учтены разные оптические параметры сенсора (отражение, пропускание и рассеяние света в оптических элементах датчика); свойства материалов, из которых изготовлены элементы датчика (оптическая проницаемость, индексы преломления и коэффициенты поглощения); свойства источника излучения (спектральный профиль, мощность и пространственное распределение).

Концентрация монооксида углерода определялась по уменьшению интенсивности излучения. Моделирование показало, что минимальная концентрация CO в воздухе, которую способен улавливать данный датчик равна 0.3 ppm.

4. Выводы

Разработанный оптический датчик, для определения концентрации угарного газа в воздухе промышленных предприятий, с одним излучателем и двумя приемниками имеет ряд преимуществ:

1. Высокая чувствительность (определяет наличие СО в воздухе при концентрации 0.3 ppm).

2. Селективность. Благодаря использованию оптического фильтра, пропускающего только свет с длиной волны, специфичной для абсорбции угарного газа, датчик восприимчив исключительно к СО. Это означает, что он способен отличать угарный газ от других, составляющих среды, что может быть полезным на промышленных предприятиях.

3. Калибровка и компенсация. Наличие референсного приемника позволяет компенсировать фоновые изменения интенсивности света, не связанные с угарным газом. Это позволяет получить более точные измерения и обеспечить стабильность работы датчика в разных условиях.

4. Скорость отклика. Спектроскопические датчики обычно обладают высокой скоростью отклика, что позволяет мгновенно обнаруживать изменения концентрации угарного газа.

5. Долговечность и надежность.

6. Совместимость с автоматизированными системами мониторинга окружающей среды.

Литература

1. Mattiuzzi C, Lippi G. Worldwide epidemiology of carbon monoxide poisoning. *Hum Exp Toxicol.* vol. 39(4), pp. 387-392, 2020.
2. Janík M, Ublová M, Kučerová Š, Hejna P. Carbon monoxide-related fatalities: A 60-year single institution experience. *J Forensic Leg Med.*, vol. 48 pp. 23-29, 2017.
3. Townsend C.L., Maynard R.L., Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide *Occupational and Environmental Medicine.* vol. 59, pp. 708-711, 2002.
4. Khalil, M.A.; Rasmussen, R.A. Carbon Monoxide in the earth's atmosphere: Increasing trend. *Science* 1984, Khalil, M.A.; Rasmussen, R.A. Carbon Monoxide in the earth's atmosphere: Increasing trend. *Science.* 224, pp. 54-56, 1984.
5. Chen, H., Karion, A., Rella, C. W., Winderlich, J., Gerbig, C., Filges, A., Newberger, T., Sweeney, C., and Tans, P. P.: Accurate measurements of carbon monoxide in humid air using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique, *Atmos. Meas. Tech.*, 6, pp. 1031–1040, 2013.
6. Bohdan H, Hlushchenko M, Bohdan I, The automated smoke detection system *International Journal «NDT Days» Volume V, Issue 5*, pp. 264-268, 2022.
7. Li, J. Laser Absorption Spectroscopy. *Encyclopedia.* Available online: <https://encyclopedia.pub/entry/1976> (accessed on 04 June 2023).
8. Du, Z.H.; Zhang, S.; Li, J.Y.; Gao, N.; Tong, K.B. Mid-Infrared Tunable Laser-Based Broadband Fingerprint Absorption Spectroscopy for Trace Gas Sensing: A Review. *Appl Sci-Basel.* №9, pp. 338, 2019.
9. Jane, H.; Ralph, P.T. Optical gas sensing: A review. *Meas. Sci. Technol.* 2013, 24.
10. Miller, D.J.; Sun, K.; Tao, L.; Khan, M.A.; Zondlo, M.A. Open-path, quantum cascade-laser-based sensor for high-resolution atmospheric ammonia measurements. *Atmos. Meas. Tech.* №7, pp. 81–93, 2014.