

ПУТИ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭТАНОЛА

А.П. Субботин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Проведён аналитический обзор волоконно-оптических датчиков для измерения концентрации этанола в водных растворах и топливных смесях. Проанализированы их характеристики: чувствительность, разрешение, диапазон измерений, температурная стабильность. В качестве перспективного направления предложено использование адресных волоконно-брэгговских структур в сочетании с радиофотонными интерроргаторами для снижения стоимости и повышения надёжности измерений.

Ключевые слова: радиофотонный сенсор, волоконная брэгговская решётка, этанол.

Введение

Этанол – бесцветное органическое вещество, часто называемое спиртом или этиловым спиртом. Он обладает привлекательными растворяющими свойствами, легко растворяется в воде и других средах. С 1970-х годов интерес к использованию этанола в качестве возобновляемого топлива или частичной замены бензина значительно возрос. Он широко рассматривается как возобновляемая альтернатива химическим веществам на основе ископаемых ресурсов, таким как биопластики, и как добавка к топливным смесям на основе этанола. Кроме того, традиционная индустрия напитков производит этанол путём дрожжевого брожения в пивоварении и виноделии, а дистилляция крепких спиртных напитков позволяет производить широкий ассортимент креплённых этанолом алкогольных напитков. Распространение использования этанола, как описано выше, также увеличивает спрос на измерение его характеристик в других секторах, таких как экологическая безопасность и охрана труда, контроль выбросов и температур разных стадий технологического процесса [1].

Материалы и методы

На практике разработан и рассмотрен ряд волоконно-оптических датчиков (ВОД) для измерения концентрации этанола, преимущественно в водных растворах. В зависимости от используемых, методы измерения можно разделить на четыре группы: абсорбционные, внешние интерферометрические, датчики с волоконной решёткой и плазмонные датчики. Датчики этих групп можно сравнить по их характерным показателям эффективности, включая чувствительность, разрешение и диапазон измерения. Особое внимание уделяется потенциальным областям применения датчиков на волоконных брэгговских решётках (ВБР) в силу их дешевизны и появления новых дешёвых радиофотонных интерроргаторов, поскольку производство этанола во всем мире рассматривается как важная отрасль промышленности.

Травленая ВБР, сконструированная в различных конфигурациях для работы в качестве рефрактометрического датчика, для смесей воды и этанола в диапазоне концентраций от 0 до 100%. Были использованы две ВБР, полученные методом влажного травления, с длинами волн Брэгга, близкими к 1300 и 1500 нм, которые показали чувствительность $6,5 \pm 0,2$ нм/RIU и $2,9 \pm 0,2$ нм/RIU при температуре $25,0 \pm 0,5$ °C соответственно. Также исследовался эффект неоднозначной связи между RI и содержанием этанола в смеси с концентрацией выше 80%.

Сенсор концентрации этанола на основе поглощения в ВБР с нанесённой тонкой плёнкой золота различной толщины. Были сравнены отклики поглощения стандартного непокрытого золотом волокна, покрытого волокна, непокрытой ВБР и покрытой ВБР. Сенсоры были покрыты тонкими золотыми плёнками толщиной 35, 40 и 50 нм, и было замечено, что увеличение толщины золотого слоя увеличивает поглощение сенсора. Сенсоры были охарактеризованы для смесей этанола и воды с концентрацией этанола от 0 до 99,7%.

Описан метод оптического зондирования, основанный на комбинации ВБР и длинно-периодной волоконной решётки (ДПВР), покрытых оксидом меди (Cu_2O). ДПВР использовалась для количественного определения этанола в смесях этанола с бензином, а ВБР – для контроля температуры. Авторы получили результаты спектров ДПВР при работе на воздухе, чистом этаноле, чистом бензине (без этанола) и смесях этанола с бензином от 1,5 до 30%. Покрытая оксидом меди ДПВР показала более высокую чувствительность. Эта оптоволоконная сенсорная система обеспечила хорошую производительность, избежав при этом использования дорогостоящих методов газовой хроматографии для определения составов образцов этанола с бензином.

Конструкция оптического датчика на основе двойных ВБР, интегрированных в структуру кольцевого лазера с эрбиевым волокном для измерения сдвига длины волны без необходимости использования спектрометра в качестве детектора этанола. Они использовали одну ВБР в качестве эталона и пропарченную ВБР в качестве чувствительного зонда.

Недавно использован датчик на травленой ВБР с избирательным покрытием GO для измерения этанола в бензине. По сравнению с непокрытой, травленая ВБР с покрытием GO продемонстрировала десятикратное увеличение чувствительности к этанолу. Этот датчик был основан на измерении изменений интенсивности спектров отражения при изменении процентного содержания этанола в бензине от 0 до 100%. Доля этанола в топливе была обнаружена вплоть до 0,5%, что было заявлено как лучшее, чем у стандартной травленой ВБР, основанной исключительно на измерениях сдвига длины волны. Чувствительность данного датчика составила 0,18 дБ/процент концентрации и пренебрежимо малая температурная чувствительность в пределах 5°C от значения температуры окружающей среды.

Результаты

Датчики, обсуждаемые в докладе, использовались для общих задач и контроля качества этанола, этанола в воде и этанола в топливе. Было отмечено, что ВБР изначально нечувствительны к химическим изменениям окружающей среды и требуют травления или уменьшения толщины оболочки, чтобы стать чувствительными к изменениям содержания этанола в окружающей среде [2]. Это делает их хрупкими и менее прочными, а перекрёстная температурная чувствительность вызывает опасения. Датчики на ВБР часто требуют дорогостоящих систем опроса, таких как спектроанализаторы или спектрометры. Эти препятствия можно преодолеть при использовании АВБС и радиофотонных интерроргаторов.

Заключение

Проведённый обзор показал, что волоконно-оптические датчики на основе модифицированных ВБР являются эффективным инструментом для измерения концентрации этанола в водных и топливных смесях. Наибольшее развитие получили технологии травления оболочки и нанесения функциональных покрытий, которые позволяют достигать высокой чувствительности и селективности. Однако для широкого внедрения таких датчиков в промышленность необходимо решить проблемы их механической прочности, температурной компенсации и снижения стоимости систем опроса.

Благодарность

Автор выражает благодарность за научное руководство профессору кафедры радиофотоники и микроволновых технологий Морозову О.Г.

Список литературы

1. Memon, S.F. A Review of Optical Fibre Ethanol Sensors: Current State and Future Prospects / S. F. Memon, R. Wang, B. Strunz et al. // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – P. 950.
2. Морозов, О.Г. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решёток Брэгга с фазовым сдвигом / О.Г. Морозов, О.А. Степущенко, И.Р. Садыков // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – Т. 3. – № 10. – С. 3-13.

WAYS TO DEVELOP FIBER-OPTIC SENSORS FOR MEASURING ETHANOL CONCENTRATION

A.P. Subbotin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. An analytical review of fiber-optic sensors for measuring ethanol concentration in aqueous solutions and fuel mixtures is presented. Their characteristics are analyzed: sensitivity, resolution, measurement range, temperature stability. Problems of fragility, cross-sensitivity and high interrogation cost are noted. As a promising direction, the use of addressed fiber Bragg structures in combination with microwave photonics interrogators is proposed to reduce cost and improve measurement reliability.

Keywords: microwave photonics sensor, fiber Bragg gratings, ethanol.

Статья представлена в редакцию 26 декабря 2025 г.