

УДК 681.785.57

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМИ МИКРОРЕЗОНАТОРАМИ

Саечников А.В., Чернявская Э.А., Саечников В.А.

*Белорусский Государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена методика регистрации параметров водных растворов, полученных в измерительной системе, основанной на матрице связанных оптических микрорезонаторов с управляемыми характеристиками. Матрица оптически связанных микрорезонаторов построена как упорядоченный набор полимерных микротороидов изготовленных методом трехмерной стереолитографии. Экспериментально продемонстрирована возможность идентификации изменений кислотности сред на уровне 0,01 на примере изменений интенсивности энергии перенесенной между связанными микрорезонаторами.

Ключевые слова: оптический сенсор, микрорезонатор, мода шепчущих галерей.

REGISTRATION OF AQUEOUS MEDIUM PARAMETERS BY OPTICALLY COUPLED MICRORESONATORS

Saetchnikov A.V., Tcherniavkaia E.A., Saetchnikov V.A.

*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents a technique for registration of aqueous solution parameters obtained in a measuring system based on a matrix of coupled optical microresonators with controllable properties. The matrix of optically coupled microresonators is constructed as an ordered set of polymer microtoroids made by three-dimensional stereolithography. The possibility of identification of changes in the acidity of media at the level of 0.01 is experimentally demonstrated using the example of changes in the intensity of energy transferred between coupled microresonators.

Key words: optical sensor, microresonator, whispering gallery mode.

*Адрес для переписки: Саечников А.В., ул. Курчатова 1, г. Минск, 220045, Республика Беларусь
e-mail: asaetchnikov@bsu.by*

Измерительные системы, использующие оптический резонанс в кольцевыми микроструктурах, стали одними из наиболее чувствительных методов для регистрации различных физических и химических параметров без использования маркеров. Широкое применение данного подхода ограничено из-за существующих конфигураций для количественной оценки изменений в окружающей среде вне лабораторных условий и низкой доступности таких систем, где требуется собирать спектрально-разрешенные данные. Один из перспективных методов решения этой проблемы – использование матрицы одиночных микрорезонаторов в виде датчика, который позволяет одновременно исследовать тысячи микрорезонаторов и многократно использовать их [1–5]. Однако для количественной оценки регистрируемых изменений в данной схеме требуется привлечение методов машинного обучения [4; 5]. В данной работе представлена методика идентификации параметров водных растворов, полученных с использованием измерительной системы, основанной на матрице связанных оптически микрорезонаторов.

Для изготовления связанных микрорезонаторов используется фоторезист SZ2080, смешанный с фотоинициатором 4,4'-Bis-(diethylamino)-benzophenon и мономером DMAEMA. В этой композиции второй мономер служит как радикальный тушитель на протяжении всего процесса полимеризации для реализации двухфотонной полимеризации с диффузией. Перед нанесением фоторезиста на подложке формировался слой полимера с малым показателем показателя преломления толщиной 400 нм, который необходим для увеличения нагруженной добротности микрорезонаторов.

В рамках работы была предложена модель сенсора состоящего из двух тороидальных микрорезонаторов находящихся на расстоянии сопоставимом с длиной волны облучающего лазера. Было выявлено, что при расстоянии между тороидами менее 500 нм наблюдается оптическая связь между модами и наблюдению рассеянного излучения для мод, которые распространяются в обратном направлении внешним лазером направлении. Геометрия каждого микрорезонатора была спроектирована таким образом, чтобы потери на рассеяние не превышали потерей на поглощение, и поэтому большой радиус тороида составлял 21 мкм, а малый радиус 1,8 мкм. Шарнир, внедренное в структуру сенсора, позволяет тороиды с минимальными искажениями с использованием стандартной послойной двухфотонной полимеризации. Схема изготовления микрорезонаторов основана на двухфотонной полимеризации и реализуется с использованием фемтосекундного Ti:Sa лазера. Изготовленные микрорезонаторы характеризуются нагруженной добротностью до 10^5 в водной среде без дополнительных этапов пост-обработки.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВЯЗАННЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

Чувствительность отдельного микрорезонатора (величина сдвига резонансной частоты от величины изменений показателя преломления) регулировалась путем изменения условий облучения фоторезиста во время создания микрорезонатора, где уменьшение плотности потока фотонов приводило к увеличению отношения площади поверхности полимера к его объему и наоборот. Кроме того, было установлено, что обратимые изменения формы микрорезонатора, вызванные контактом с обнаруживаемыми молекулами, приводят к увеличению отклика на изменения показателя преломления в объеме более чем в 20 раз по сравнению с численными расчетами, основанными на ближнепольном отклике. В случае связанных микрорезонаторов это приводит к изменению условий переноса энергии между микрорезонаторами и изменению величины энергии, наблюдаемой в модах, распространяющихся в противоположном направлении. Таким образом к спектральному отклику микрорезонаторов на изменения в окружающей среде добавляется дополнительный параметр величины перенесенной энергии, количественная оценка которого не требует спектрально-разрешенных методов регистрации.

Для оценки эффективности метода детектирования на связанных микрорезонаторах изготавливались образцы из не менее 100 структур по два микрорезонатора. Для надежного переноса энергии в матрицу оптических микрорезонаторов мы использовали ранее разработанную методику параллельного опроса на основе оптической призмы, которая позволяет опрашивать резонаторы при фиксированной длине волны. Условия возбуждения резонанса были настроены путем оптимизации угла заведения и поляризации излучения для формирования фундаментальной моды.

Анализ производительности сенсора, основанного на связанных микрорезонаторах, исследовался на примере регистрации изменений показателя кислотности среды, где ее величина варьировалась растворами соляной кислоты и гидроксида натрия. Было показано, что направление изменения величины перенесенной энергии между резонаторами коррелирует с изменением показателя кислотности среды (при увеличении кислотности сигнал усиливается, при уменьшении становится слабее). Одиночные микрорезонаторы, которые опрашиваются и фиксированной длине волны характеризуются нелинейными флуктуациями интенсивности между устойчивыми состояниями, а динамические изменения между ними в течение

времени обладают сложной структурой. В отличие от них связанные микрорезонаторы показывают линейный отклик для перенесенной энергии в зависимости от величины изменения кислотности среды, что упрощает методику количественной оценки откликов. Из-за естественного разброса характеристик чувствительности микрорезонаторов обобщенный отклик сенсора просчитывался как первая главная компонента, которая представляет собой линейную комбинацию изменений перенесенной энергии для всех связанных структур и отражает наиболее наибольшую дисперсию во всем наборе данных. Такое представление спектральных изменений имеет преимущества для учета различной чувствительности микрорезонаторов и снижения влияния локальных изменений/шумов, которые классифицируются как незначительные компоненты с помощью анализа главных компонент (PCA). Для связанных микрорезонаторов была определена возможность детектирования изменений кислотности на уровне 0,01 (предел чувствительности электрохимического сенсора кислотности).

Представленные результаты демонстрируют возможность идентификации физических и химических параметров водных сред на основе оптически связанных микрорезонаторов. На примере матрицы связанных полимерных микрорезонаторов продемонстрирована возможность детектирования изменений кислотности среды по значению интенсивности перенесенной энергии мод на уровне 0,01.

Литература

1. Reusable Dispersed Resonators-Based Biochemical Sensor for Parallel Probing / A.V. Saetchnikov [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. – 2019. – Vol. 19, № 17. – P. 7644–7651.
2. A Laser Written 4D Optical Microcavity for Advanced Biochemical Sensing in Aqueous Environment / A.V. Saetchnikov [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2020. – Vol. 38, № 8. – P. 2530–2538.
3. Multiresonator Imaging Sensor for the Aerial Parameters Detection / A.V. Saetchnikov [et al.] // *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 84–91.
4. Deep-learning powered whispering gallery mode sensor based on multiplexed imaging at fixed frequency / A.V. Saetchnikov [et al.] // *Opto-Electronic Advances*. – 2020. – Vol. 3. – P. 200048.
5. Intelligent optical microresonator imaging sensor for early stage classification of dynamical variations / A.V. Saetchnikov [et al.] // *Advanced Photonics Research*. – 2021. – Vol. 7. – P. 2100242.