

## Матрица микрорезонаторов как высокочувствительный сенсор водных примесей

А. В. Саечников<sup>1,2)</sup>, Э. А. Чернявская<sup>1)</sup>, В. А. Саечников<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь,

<sup>2)</sup>Рурский Университет, Бохум, Германия,

e-mail: [anton.saetchnikov@gmail.com](mailto:anton.saetchnikov@gmail.com)

В работе демонстрируется возможность регистрации водных примесей матрицами активных микрорезонаторов с управляемыми свойствами. Высокая точность обнаружения в сочетании с доступностью прибора и простотой производства делают представленный детектор одним из наиболее эффективных вариантов реализации метода, основанного на использовании оптического резонанса в кольцевых микроструктурах. Показано, что спектральной динамика микрорезонаторов меняется при концентрации примесей вплоть до 1 частицы на миллиард по отношению к чистой водной среде.

**Ключевые слова:** оптический сенсор; микрорезонатор; мода шепчущих галерей; водные примеси.

## Microresonator matrix as a highly sensitive sensor of aqueous impurities

A. V. Saetchnikov<sup>1,2)</sup>, E. A. Tcherniavskaia<sup>1)</sup>, V. A. Saetchnikov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus,

<sup>2)</sup>Ruhr University, Bochum, Germany,

E-mail: [anton.saetchnikov@gmail.com](mailto:anton.saetchnikov@gmail.com)

The paper demonstrates the possibility of registration of aqueous impurities by matrices of active microresonators with controllable properties. High accuracy of detection in combination with availability of the device and simplicity of production make the presented detector one of the most effective variants of realization of the method based on the use of optical resonance in ring microstructures. It is shown that the spectral dynamics of microresonators changes at impurity concentrations down to 1 particle per billion with respect to pure aqueous medium.

**Keywords:** optical sensor; microresonator; whispering gallery mode; aqueous impurities.

### Введение

Фторсодержащие вещества благодаря отталкивающим свойствам получили большое распространение как поверхностно-активные вещества и характеризуются высокой термической и химической стабильности, что предотвращает их разложение в воде при воздействии света или бактерий. Со временем это приводит к накоплению данных веществ и загрязнению окружающей среды. Оптические методы обнаружения микро и нано-объектов в водных средах отличаются компактностью, доступностью и высокой чувствительностью. Сенсоры, основанные на оптических микрорезонаторах, являются развитием волоконного способа детектирования с увеличенной длиной взаимодействия оптического поля с исследуемым раствором. Микрорезонаторы представляют собой замкнутый кольцевой контур двух- или трехмерной геометрии, где оптическое поле распространяется вдоль его

контура. Моды, которые удовлетворяют условию конструктивной интерференции, называются модами галереи шепчущихся (МШГ) и характеризуются высоким коэффициентом добротности, который, однако, ограничен потерями на поглощение. Для их компенсации в материал микрорезонатора вносится активная среда (обычно органические флуоресцентные красители). Моды, существующие в области максимального усиления, достигают порога генерации, и возбуждается лазерное излучение с увеличенным коэффициентом добротности. При этом измерительный потенциал микролазеров часто ограничен низким разрешением стандартных спектроскопических приборов. Одним из перспективных подходов к детектированию является матричный сенсор микрорезонаторов, где обеспечивается возможность многократного использования и параллельного опроса до тысячи микрорезонаторов [1–4]. В данной работе демонстрируются результаты измерений фторсодержащих водных загрязнителей мультиплексным сенсором из активных микрорезонаторов.

## 1. Материалы и методы

Микрорезонаторы изготавливались из золь-гель фоточувствительного материала SZ2080, который предварительно смешивался с фотоинициатором 4,4'-Bis-(diethylamino)-benzophenon, мономером DMAEMA и флуоресцентным красителем родамин 6G. Образец нагревали при 80°C в течение 30 минут перед фотополимеризацией для испарения растворителя и обеспечить стабильной связи полимерной структуры с подложкой. Полимеризация производилась в схеме двухфотонного поглощения, что было реализовано с использованием фемтосекундной импульсной титан-сапфировой лазерной системы [4]. Для одновременной генерации лазерного излучения в активированных микрорезонаторах использовалась геометрия на основе оптической призмы. Вместо классического подхода последовательного анализа спектров для каждого отдельного микролазера мы предложили схему параллельного сбора сигнала в дальней зоне с использованием цифровой камеры, при этом сигнал проходил через спектральный фильтр, представленный Фабри-Перо интерферометром с периодом 200 пм и полушириной 2 пм. Генерация возбуждалась с использованием перестраиваемого наносекундного лазера (настроенного на длину волны 530 нм) с частотой повторения 10 Гц и максимальной энергией 10 мДж.

## 2. Результаты

Использование микрорезонаторов с двухфотонной полимеризацией, изготовленных из материала SZ2080, особенно привлекательно благодаря эффекту самообнаружения структуры микрорезонатора, что позволяет создавать систему сенсоров, изготовленных методом четырехмерной печати. Механизм самообнаружения возникает из-за сил увеличения и уменьшения размеров, действующих на геометрию резонатора при погружении в разные растворы [4]. В частности, при размещении резонаторов в фосфатный буфер, молекулы начинают проникать в полимерную структуру, что приводит к расширению резонатора и при смене раствора на воду, когда полимерная структура начинает сжиматься.

Отклик микрорезонаторов на фторсодержащие загрязнители исследовался последовательной заменой чистой деионизированной воды на загрязненную воду. В ходе этих исследований использовались относительно высокие уровни загрязнения (0,1–10 частиц на миллион). Было определено, что при замещении чистой воды на загрязненную обобщенный отклик показывает явную негативную тенденцию, указывающую на сжатие микрорезонаторов. Поэтому для увеличения чувствительности микрорезонаторы размещались предварительно в фосфатном буфере для набухания полимерной структуры. Поскольку как чистая, так и загрязненная вода приводят к сжатию микрорезонатора, характерные динамические изменения, измеренные для загрязненных растворов, сравнивались с изменениями в чистой воде. Было показано, что загрязнение на уровне 1 частица на миллиард приводит к изменениям в динамике спектральных изменений по сравнению с чистой водой. Чем больше загрязнителей присутствует в воде, тем более выражен отрицательный наклон в динамике, что указывает на ускорение процесса сжатия в присутствии фторсодержащего загрязнителя. Кроме этого, меняется динамика, где для больших концентраций (на уровне 1 частица на миллион) наблюдается две фазы с ускорением динамики ответа сенсора в первой фазе и замедлением во второй фазе по сравнению с водой.

### **3. Заключение**

Представленные результаты демонстрируют возможность обнаружения фторсодержащих загрязнителей воды с использованием матричного сенсора оптических микрорезонаторов. Сенсор из сотен активных микрорезонаторов, изготовленных с помощью двухфотонной полимеризации, и используемый в схеме параллельного пороса обеспечивает чувствительность до 1 фтосодержащей частицы на миллиард.

### **Библиографические ссылки**

1. Reusable Dispersed Resonators-Based Biochemical Sensor for Parallel Probing. / A. V. Saetchnikov [et al.] // IEEE Sensors Journal. 2019. Vol. 19, No. 17. P. 7644–7651.
2. 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.
3. 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.
4. 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, No. 8. P. 2530–2538.