

Из результатов расчетов видно, что трубчатое сечение выигрывает и по прочности, и по жесткости. Но требуется получить максимальные прочность и жесткость при минимальной высоте профиля. Поэтому рассчитаны относительные параметры $\frac{J_x}{H}$ и $\frac{W_x}{H}$. Из их анализа видно, что трубчатое сечение действительно является наиболее выгодным. Однако, заслуживают внимания такие более технологически простые сечения, как П-образное и уголковое.

Выводы. Наилучшими параметрами с точки зрения максимальных прочности и жесткости при минимальной высоте профиля обладает трубчатое сегментное сечение.

Трубчатое сегментное сечение является недостаточно технологичным, так как для некоторых

материалов получение сортамента в виде трубок является затруднительным. Поэтому следует обратить внимание на фрезерованные профили, такие как П-образный и уголковый.

Для трубчатого сегментного профиля рост относительных прочности и жесткости при увеличении радиуса несущественен.

Для уголкового профиля оптимальным является диапазон углов 100...135°.

Благодарности. Работа выполнена в интересах и при поддержке Научно-технологического парка БНТУ «Политехник».

Литература

1. Справочник машиностроителя.: в 6 т. / Под ред. С. В. Серенсен. – М.: Машгиз, 1962. – Т. 3. – 1962. – 652 с.

УДК 681.785.57

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ МАТРИЦЕЙ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

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

*Белорусский Государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена методика идентификации динамических параметров сложных растворов, полученных в измерительной системе основанной на матрице оптических микрорезонаторов с управляемыми характеристиками. Матрица микрорезонаторов построена как упорядоченный набор полимерных микротороидов изготовленных методом трехмерной стереолитографии, где динамические данные измеряемых соединений анализируются нейронной сетью долговременной памяти из двунаправленных и выпадающих слоев. Экспериментально продемонстрирована возможность идентификации концентраций отдельных компонент сложных растворов с точностью > 99%, за промежуток времени на два порядка меньше, чем требуется для достижения устойчивого состояния.

Ключевые слова: оптический микрорезонатор.

IDENTIFICATION OF THE DYNAMIC FEATURES OF MULTICOMPONENT SOLUTIONS BY A MATRIX OF MICRORESONATORS WITH TUNABLE PARAMETERS

Saetchnikov A., Tcherniavkaia E., Saetchnikov V.

*Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The paper presents a technique for identifying dynamic parameters of complex solutions obtained in a measuring system based on a matrix of optical microresonators with controllable characteristics. The matrix of microresonators is constructed as an ordered set of polymeric microtoroids fabricated by three-dimensional stereolithography, where the dynamic data of the measured compounds are analyzed by a neural network of a long-term memory consisting of birefringent and dropout layers. It was experimentally demonstrated that it is possible to identify the concentrations of individual components of complex solutions with an accuracy of > 99 %, in a time interval on two order of magnitude shorter than that required to observe equilibrium.

Key words: optical microresonator.

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

За последнее десятилетие измерительные системы на основе резонанса в микрополостях стали одной из наиболее чувствительных оптических методик безмаркерной регистрации различных физических и химических параметров. Однако, в отличие от методов спектрального детектирования, например, рамановская спектроскопия, которая обеспечивают молекулярный анализ, для обеспечения анализа сложных растворов необходима

интеграция матриц микрорезонаторов с различной специфичностью связывания. Кроме этого, широкому использованию этого подхода препятствует ограниченная применимость известных конфигураций для количественной оценки изменений окружающей среды вне лабораторных условий и их низкая доступность, где необходимость сбора спектрально-разрешенных данных является одним из основных ограничивающих

факторов. Одним из перспективных методов реализации является датчик в виде матрицы микрорезонаторов, где возможность многократного использования и параллельный опроса до тысячи микрорезонаторов делают эту платформу особенно привлекательной [1–7]. В работе представлена методика идентификации динамических параметров сложных раствором, полученных в измерительной системе основанной на матрице оптических микрорезонаторов с управляемыми характеристиками.

Для изготовления микрорезонаторов был использован золь-гель фоторезист SZ2080, смешанный с фотоинициатором 4,4'-Bis-(diethylamino)-benzophenon и дополнительным мономером DMAEMA [2]. Для испарения растворителя и обеспечения стабильной связи полимерной структуры с предварительно силанизированной подложкой, проба нагревалась при 70 °С в течение 4 часов. Схема прямой лазерной печати на основе двухфотонной полимеризации реализована с стандартной схемой облучения материала на основе фемтосекундной импульсной титан-сапфировой лазерной системы.

В рамках исследований была предложены две модели оптического микрорезонатора на основе микротороида. Первая модель предполагает точечную связь кольцевого резонатора с поверхностью стеклянной подложки, вторая – содержит элемент обеспечения зазора между нижней частью кольца и стеклянной подложкой, размеры которого определяются моделью. В качестве управляемых свойств микрорезонатора были выбраны два параметра определяющих предел детектирования: чувствительность и добротность. Параметр чувствительности управлялся путем контроля условий облучения фоторезиста на этапе конструирования микрорезонатора, где меньшая плотность потока фотонов приводила к увеличению соотношению площади поверхности полимера к его объему и наоборот. Параметр нагруженной добротности варьировался зазором между микрорезонатором и подложкой. Для первой модели резонатора предварительно наносился тонкий слой клеевого раствора в диапазоне до длины волны лазерного излучения, для второй – устанавливался в модели. Для обеих моделей при настройке зазора в 400 нм продемонстрирована возможность обеспечения нагруженных добротностей до 10^5 . Было продемонстрировано, что обратимые изменения формы микрорезонатора, вызванные контактом с детектируемыми молекулами, приводят к усилению отклика на изменения объемного показателя преломления более чем в 20 раз по сравнению с численными оценками, основанных на отклике ближнего поля.

Для выделения и идентификации составляющих сложных растворов на матрице формируется до девяти отдельных измерительных каналов с не менее 100 резонаторами в каждом. Для обеспече-

ния инвариантности результатов от долговременных вариаций температуры в методике мультиплексного детектирования предложено покрытие одного измерительного канала полидиметилсилоксаном для изоляции поверхности сенсоров от измеряемых растворов. Оптическая призма использовалась для стабильного переноса энергии в матрицу оптических микрорезонаторов, где испускаемое резонаторами излучение детектируется на фиксированной длине волны [3–5].

Анализ сложных многокомпонентных соединений продемонстрирован на примере регистрации связи антител (иммуноглобулины различной природы: человеческий, кроличий) и соответствующих им антигенов на поверхности микрорезонаторов. Таким образом, динамические отклики микрорезонаторов определяются процессом формирования связи антиген-антитело, для которой наблюдается сложная двухфазная динамика. Первая фаза связана с перемешиванием раствора в измерительной камере и последующим локальным равновесием с точки зрения объемного показателя преломления и соответствующего насыщения спектрального сдвига. Вторая фаза характеризуется долговременными изменениями и описывается спектральный отклик из-за одновременной реакции на осаждение объектов на поверхности сенсора а также сил набухания/сжатия. Динамика в неподвижных измеряемых жидкостях описывается однофазной динамикой с повышенной скоростью спектрального сдвига, демонстрирующей влияние скорости потока на процесс извлечения проникающих молекул. Было продемонстрировано, что путем обучения интеллектуальной системы обработки экспериментальных данных для текучих и неподвижных водных сред можно добиться точной (> 99%) оценки концентрации отдельных составляющих сложных растворов. Интеллектуальный механизм обработки, который обучается на основе сложных нелинейных динамических реакций оптических микрорезонаторов, основан на сети долгой краткосрочной памяти с 15 блоками, двунаправленной архитектурой и 100 эпохами обучения в качестве максимального числа [6–7]. При этом временной набор спектрального сдвига уменьшается от начальной длительности в несколько тысяч до первых десятков секунд после регистрации динамических изменений.

Представленные результаты демонстрируют возможность идентификации динамических параметров сложных раствором на основе интеллектуального матричного сенсора оптических микрорезонаторов. Предложенный подход может быть использован в широком спектре практико-ориентированных задач высокочувствительного безмаркерного детектирования.

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 Minia-turization 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. Self-learning-based detection via multiple microresonator imaging / A. V. Saetchnikov [et al.] // Proc. SPIE. – 2021. – Vol 11782. – P. 117822E.

6. Intelligent optical microresonator imaging sensor for early stage classification of dynamical variations / A. V. Saetchnikov [et al.] // Advanced Photonics Research. – 2021. – P. 2100242.

7. Machine-learning based analysis of time sequences for multiplexed microresonator sensor / A. V. Saetchnikov [et al.] // Proc. SPIE. – 2022. – Vol 12139. – P. 121390E.

УДК 666.7

**ТЕРМОСТОЙКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА**
Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Самсонова А.С.¹, Пантелеенко Ф.И.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Показана возможность получения синтетического волластонита из отечественных сырьевых материалов. Представлены результаты исследований термостойких керамических изделий; установлены закономерности изменения физико-технических, теплофизических характеристик и рентгеноструктурных показателей керамики на основе различного природного сырья, а также отходов химических производств. Результаты исследований могут использоваться для производства теплоизоляционной керамики, электроизоляторов, детали для литейных установок на основе синтетического волластонита.

Ключевые слова: синтетический волластонит, техническая керамика, температурный коэффициент линейного расширения, термостойкость, синтез.

**HEAT-RESISTANT CERAMIC MATERIALS
BASED ON SYNTHETIC WOLLASTONITE**
Popov R.¹, Dyatlova E.¹, Samsonova A.¹, Panteleenko F.²

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of obtaining synthetic wollastonite from domestic raw materials is shown. The results of studies of heat-resistant ceramic products are presented; the regularities of changes in physical-technical, thermophysical characteristics and X-ray diffraction parameters of ceramics based on various natural raw materials, as well as chemical production wastes, have been established. The research results can be used for the production of heat-insulating ceramics, electrical insulators, parts for foundry installations based on synthetic wollastonite.

Key words: synthetic wollastonite, technical ceramics, temperature coefficient of linear expansion, heat resistance, synthesis.

Адрес для переписки: Самсонова А.С., ул. Белорусская, 21, Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: misakamadara@yandex.by

В настоящее время одним из востребованных направлений современной науки является получение синтетического волластонита. Важными технологическими свойствами волластонита являются высокая химическая стойкость в различных средах, небольшая удельная масса, уникальные диэлектрические свойства, игольчатый габитус частиц, а также низкие значения коэффициента термического расширения и теплопроводности [1].

Различные исследования подтвердили принципиальную возможность использования природного и синтетического волластонита в качестве

сырья для получения теплоизоляционной керамики, электро- и теплоизоляторов с чрезвычайно низкими диэлектрическими потерями, специальной радиокерамики, для производства заготовок и слитков в горизонтальных и вертикальных литейных установках, т.е. форсунки, носики, поплавки, стопоры и кольца с горячим верхом [2, 3].

Высокая активность к спеканию тонкодисперсной фракции волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики при минимальном содержании спекающей добавки, не снижая термостойкости, а в некоторых случаях