

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. В. Саечников^{1,2}, Э. А. Чернявская¹, В. А. Саечников¹

¹Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь

²Рурский Университет, Бохум, Германия

E-mail: anton.saetchnikov@gmail.com

В работе рассматривается применение методов машинного обучения для обработки динамических откликов, полученных на основе оптического детектирования биохимических сред оптическими микрорезонаторами с управляемыми свойствами. Продемонстрирована возможность определения параметров измеряемой среды с точностью >99% за временной интервал в 4 раза меньшее, чем требуется для достижения равновесного состояния.

Ключевые слова: *оптический микрорезонатор, машинное обучение, детектирование, мода шепчущей галереи.*

Механизм детектирования биохимических сред на основе явления мод шепчущей галереи (МШГ) – это метод, основанный на возбуждении стоячих волн внутри оптического микрорезонатора с круговой симметрией и характеризующийся возможностью регистрации параметров сред без использования меток [1,2]. Регистрация внешних возмущений основана на взаимодействии моды с окружающей средой через эванесцентное поле, локализованное вблизи поверхности. Несмотря на значительный прогресс в развитии метода в плане чувствительности, отклик оптического микрорезонатора исследуется с использованием метода частотного сканирования. Для практико-ориентированных задач предложена методика опроса сенсора на фиксированной частоте [3,4]. Отклик, однако, имеет сложный многомерный характер, что затрудняет его оценку с помощью существующих аналитических моделей. Решения на основе машинного обучения позволяют интерпретировать сложный сенсорный отклик.

В данной статье предложен механизм детектирования, основанный машинном обучении для анализа динамических откликов микрорезонаторов с управляемыми свойствами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовалась методика одновременной регистрации МШГ в множестве микрорезонаторов, которая основана на возбуждении оптической призмой и регистрации рассеянного излучения камерой. Источником излучения служил одночастотный лазер (785 нм). Регистрируемый сигнал представляет собой набор интенсивностей, которые модулируют-

ся спектральными свойствами каждого резонатора относительно спектрального положения и ширины лазерной линии. Сигнал для одной микросферы определяется как сумма интенсивностей связанных с резонатором пикселей.

В работе предложены две модели оптического микрорезонатора на основе микротороида для изготовления методом двухфотонной полимеризации. 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 сенсора были определены два параметра: чувствительности и добротность.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Отклик структуры микрорезонатора на микро/нано частицы, растворенные в водной среде, позволяет усилить взаимодействие экспоненциальной части поля моды за счет структурных вариаций геометрии микрорезонатора. Увеличение добротности на заведение может обеспечить условия согласованности ближних полей оптической призмы и микрорезонатора для максимизации общей добротности. 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 – определялся геометрией модели. Для обеих моделей при обеспечении зазора в 400 нм продемонстрирована возможность обеспечения нагруженных добротностей до 10^5 . 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. При этом время до достижения стационарного состояния увеличивается до одного порядка, что характеризуется ярко выраженной динамикой вариаций.

Для анализа динамических изменений была выбрана сеть длинной цепи элементов краткосрочной памяти (LSTM) основанной на двунаправленной архитектуре с 100 эпохами обучения. Экспериментальный набор данных включает динамические изменения, которые были получены с использованием временного градиента значения показателя преломления

в измерительной камере. Для этого исходная среда (вода) смешивалась с поступающими растворами с различным показателем преломления при постоянной скорости прокачки. Было выбрано пять различных процентных долей этанола, растворенного в воде с разбросом в показателях преломления до 10^{-4} . В ходе работы изучено влияние количества микрорезонаторов и сложности сети на точность. Установлено, что количество значимых признаков может быть уменьшено в четыре раза по сравнению с общим количеством резонаторов сенсора. Показано, что уровень точности предсказания в 99% смещается в сторону уменьшения длительности динамических изменений по мере увеличения сложности сети. Уровень точности 99% достигается в течение 150 с после начала регистрации динамических изменений для LSTM сети с 15 блоками, что в ≈ 4 раза быстрее, чем временной интервал, необходимый для наблюдения стационарного состояния в сигнале оптического микрорезонатора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод анализа динамических изменений, основанный на методах машинного обучения (LSTM сеть), измеренных на базе датчика оптического микрорезонатора с управляемыми свойствами. На основе экспериментальных данных с временным градиентом показателя преломления с относительной разницей на уровне 10^{-4} продемонстрирована возможность предсказания концентрации измеряемого раствора с точностью $>99\%$ за временной промежуток в 4 раза быстрее, чем наступает состояние равновесия в измерительной кювете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Vollmer F., Arnold, S. Whispering-gallery-mode biosensing: Label-free detection down to single molecules // *Nature methods*. 2008. 5(7), P. 591–596.
2. Jiang X., Qavi A. J., Huang S. H., Yang, L. Whispering-gallery sensors // *Matter*. 2020. 3(2). P. 371–392.
3. Saetchnikov A. V., Tcherniavskaia E. A., Saetchnikov V. A., Ostendorf, A. Multiresonator imaging sensor for the aerial parameters detection // *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. 2021. 2(2). P. 84–91.
4. Saetchnikov A. V., Tcherniavskaia E. A., Saetchnikov V. A., Ostendorf, A. Intelligent optical microresonator imaging sensor for early stage classification of dynamical variations // *Advanced Photonics Research*. 2021. 7. P. 2100242.