

УДК 621.38:681.54:628.16

ДАТЧИКИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОДИ НА ОСНОВІ ПОВНОГО ВНУТРІШНЬОГО ВІДБИТТЯ

Кондрат В.В.

e-mail: valeriia.kondrat@nure.ua

Науковий керівник – к.ф.-м.н., доц. Галат О.Б

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП,
м. Харків, Україна

The report considers the prospects for research into water quality monitoring sensors based on total internal reflection. A review of modern methods and approaches to water quality assessment is made, a generalized classification of water monitoring sensors is presented. The principles of operation of water quality monitoring sensors based on total internal reflection are disclosed, and their sensitivity based on experimental data is estimated. A comparison of the measurement accuracy limits of the sensors under consideration has been performed.

Забруднення водойм є однією з найбільш серйозних екологічних проблем сучасності. Токсичні хімікати, важкі метали, нафтопродукти, органічні відходи та мікроорганізми роблять воду небезпечною для вживання людиною. Традиційні хімічні методи аналізу якості води потребують наявності вартісного обладнання та кваліфікованих спеціалістів, часу на транспортування зразків води до лабораторії та на проведення аналізу. Враховуючі це з'являється потреба у розробці мобільного, компактного, енергоефективного і чутливого сенсора для виявлення наявності і точної оцінки концентрації забруднюючих речовин у водоймі.

Метою роботи є огляд сучасних методів моніторингу якості води, аналіз сучасного стану датчиків моніторингу якості води на ефекті повного внутрішнього відбиття, оцінка перспектив подальшого дослідження і удосконалення датчиків моніторингу якості води на ефекті повного внутрішнього відбиття.

Стан води визначається такими показниками, як: кислотність (pH), температура, розчинений кисень, окислювально-відновний потенціал, каламутність, провідність, солоність, загальна кількість розчинених твердих речовин. Датчики для оцінки цих показників поділяються на електрохімічні, фізичні і біологічні. Електрохімічні датчики вимірюють зміну сигналу, який залежить від хімічних реакцій, що протікають на електроді під час взаємодії з аналітом. Для вимірювання солоності води часто використовують датчики електропровідності води. Біосенсори реагують з різними хімічними речовинами за рахунок затверділих мікроорганізмів, антитіл, органел і ферментів всередині біокатализаторів на поверхні електроду. Фізичні датчики переважно є оптичними та включають в себе: колориметричні, спектроскопічні, флуоресцентні, люмінесцентні, інтерферометричні, нефе-

лометричні та інші типи датчиків. Більшість оптичних датчиків якості води застосовують оцінку пропускання, розсіювання, поглинання та випромінювання світла, що контактує з аналітом.

Застосування ефекту повного внутрішнього відбиття в рамках відомих підходів відкриває нове поле досліджень, зокрема необхідною є оцінка максимально можливої чутливості датчиків даного типу. Відкритими для вивчення залишаються такі напрямки, як: випробування різних матеріалів та їх комбінацій, розробка нових конструкцій датчиків, тестування різних джерел опромінення та дослідження відгуку датчика на різних довжинах хвиль.

В роботі [1] описано датчик, що використовує як сигнал різницю фаз між р- та s-поляризованими компонентами світла, відбитими від межі розділу Si/вода в геометрії повного внутрішнього відбиття. Сенсор фіксує різницю фаз світла, що відображене від внутрішнього краю кремнієвої призми, яка контактує з водою. Різниця фаз відбитого світла пов'язана із показником заломлення наступною формулою:

$$\Delta = \delta_p - \delta_s = 2 \arctan \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{n_m}{n_0}\right)^2 \theta_i - 1}}{\left(\frac{n_m}{n_0}\right) \sin \theta_i \cdot \tan \theta_i} \right],$$

де n_0 – показник заломлення води, n_m – показник заломлення призми, θ_i – кут падіння. За зміною показника заломлення оцінюється концентрація розчинених речовин у воді, у тому числі шкідливих. Експериментально було виявлено, що зміна показника заломлення, виміряна за допомогою такого датчика з використанням установки фазового детектування на основі поляриметриї, складає порядку 10^{-6} . Сучасні датчики на ефекті поверхневого плазмонного резонансу мають роздільність такого ж порядку.

В статті [2] запропоновано конструкцію датчика для аналізу рідин на основі інфрачервоної спектроскопії послабленого повного відбиття (ATR – attenuated total reflection). Чутливим елементом датчика є кремнієва пластина; для покращення характеристик датчика та зменшення поглинання застосовується нанесення тонких покриттів, зокрема, сапфіру та алмазу. У досліді використовувались зразки кремнію без покриття та з нанесеними плівками нанокристалічного алмазу. Однією стороною кремнієва пластина контактує з досліджуваною рідиною. Перпендикулярно до пластини подається випромінювання, після серії відбиттів у пластині випромінювання виходить з неї і потрапляє на фотодетектор. У ході експерименту було виміряно мінімальну концентрацію досліджуваної речовини у розчині, що складає 100 мг/л.

В роботі [3] розроблена компактна надійна сенсорна система для швидкого виявлення концентрації розчинених речовин у воді. ІЧ-випромінювання потрапляє на чутливий елемент, пластину з селеніду цинку ZnSe, через порожнисті хвилеводи. Як джерело інфрачервоного ви-

промінювання використовується резонаторний квантовий каскадний лазер, що охоплює діапазон довжин хвиль від 1900 см^{-1} до 900 см^{-1} . В якості аналіту використовувався етанол, розчинений у воді. В результаті експерименту були отримані спектри пропускання, за якими було розраховані спектри поглинання. Виявлено, що межа виявлення датчика становить $0,045\text{ мас.}\%$.

В роботі [4] пропонується датчик для вимірювання показника заломлення, заснований на внутрішньому відбитті дифузного світла від межі скло/зразок, що виготовлений з скляної пластини з розсіювальною поверхнею. Фізичний принцип, що використовується у запропонованій конструкції датчика – залежність відбитої оптичної потужності від межі скло/зразок від коефіцієнта заломлення зразка. Джерелом світла є світлодіод, випромінювання потрапляє на скляну розсіювальну поверхню, відбите від неї світло потрапляє на фотодетектор, що вимірює потужність розсіюваного світла. Коефіцієнт заломлення рідини визначається за теоретично отриманою калібрувальною кривою. Експериментальний прототип датчика показав роздільну здатність у змінах показника заломлення прозорих рідин дещо меншу ніж $0,001$.

Датчики моніторингу якості води на основі ефекту повного внутрішнього відбиття мають достатню чутливість для виявлення забруднень у воді та виміру концентрації розчинених речовин. Вони можуть мати роздільну здатність, порівняну з іншими типами датчиків. Вони дешеві, компактні та можуть засовуватись для вимірів у реальному часі, тому їх вивчення є перспективним напрямком в екологічному моніторингу.

Список використаних джерел:

1. Patskovsky S., Song I.-H., Meunier M., Kabashin A. V. Silicon based total internal reflection bio and chemical sensing with spectral phase detection // *Optics Express*. 2009. Vol. 17, No. 23. P. 20847–20853.
2. Lambrecht A., Bolwien C., Fuhr H., Sulz G., Isserstedt-Trinke A., Magi A., Biermann S., Wöllenstein J. Compact silicon-based attenuated total reflection (ATR) sensor module for liquid analysis // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2023. Vol. 12. P. 123–131. DOI: <https://doi.org/10.5194/jsss-12-123-2023>.
3. Teuber A., Mizaikoff B. Robust attenuated total reflection infrared spectroscopic sensors based on quantum cascade lasers for harsh environments // *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, No. 1. P. 814–821. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3330525>.
4. Pineda-Vázquez D., García-Valenzuela A. Functional refractive-index sensor by internal reflection of diffuse light // *Sensor Review*. 2023. Vol. 43, No. 1. P. 12–21.