

## Метод квазинепрерывного контроля частоты акустического резонанса фотоакустического детектора на основе кварцевого резонатора\*

А.В. Борисов<sup>1</sup>, В.В. Николаев<sup>1</sup>, Ю.В. Кистенев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Предлагается подход к решению задачи непрерывной автоподстройки частоты модуляции источника оптического излучения, основанный на использовании двух близких по параметрам кварцевых резонаторов, расположенных близко друг к другу, но акустически изолированных. На примере температурных зависимостей показано, что при использовании двух акустически изолированных кварцевых резонаторов, осуществляя поиск резонансной частоты на одном, можно подстраивать частоту модуляции оптического излучения, подающегося на другой.

**Ключевые слова:** камертон, фотоакустическая спектроскопия, амплитудно-модулированное оптическое излучение, подстройка частоты.

### Введение

Метод фотоакустической спектроскопии с кварцевым усилением (кварцево-усиленная фотоакустическая спектроскопия – КУФАС) обладает более высокой чувствительностью по сравнению с другими вариантами фотоакустической спектроскопии [1, 2]. В данном методе акустическая волна, возникающая при поглощении амплитудно-модулированного оптического излучения, регистрируется кварцевым камертоном. Кварц является пьезоэлектриком, следовательно, при возбуждении в нем вынужденных колебаний он генерирует электрический сигнал, величина которого прямо пропорциональна концентрации газа [3]. Достоинством такого детектора является независимость сигнала от длины волны, что позволяет его использовать, например, для детектирования как колебательных, так и вращательных линий поглощения.

Существует множество конкретных реализаций метода КУФАС, например, помимо классических вариантов в работе [4], в котором резонансное возбуждение камертона достигалось за счет передачи импульса фотона путем фокусировки модулированного лазерного луча на один зубец, в работе [5] лазерный луч направляется через акустический резонатор, а камертон размещается вне акустического резонатора (в работе использовалась трубка из нержавеющей стали) для внелучевого детектирования резонансного фотоакустического сигнала. В [6] для приложений инфракрасной спектроскопии разработан фотоэлектрический детектор на основе стандартного кварцевого камертона. В работе [7] описывается метод определения концентрации газа, основанный на КУФАС и модуляции длины волны с использованием диодного лазера ближнего инфракрасного диапазона.

Подход КУФАС получил эффективное применение в ТГц-диапазоне, так как регистрация ТГц-волн при комнатной температуре проблематична для электронных детекторов из-за их высокой частоты и низкой энергии фотонов для оптических детекторов. В ТГц-диапазоне большинство газов обладает слабым поглощением, т.е. низким отношением сигнал/шум. В работе [8] описана фотоакустическая система обнаружения газов, работающая в ТГц-диапазоне и использующая специальную кварцевую камерную вилку. Для тестирования датчика использовали квантовый каскадный лазер. В работе [9] предложен фотоакустический датчик с кварцевым усилителем для обнаружения метанола с использованием кварцевого камертона, разработанного для повышения эффективности датчика в ТГц-диапазоне, получены зависимости свойств камертона для добротности в зависимости от его размера и расстояния между зубцами.

Применение КУФАС разнообразно и имеет множество ответвлений. Разрабатываются различные новые варианты кварцевых камертонов, например, в работе [10] представлен камертон с четырьмя зубцами с увеличенной площадью деформации, большим зазором между зубцами и низкой резонансной частотой, что повышает его эффективность при лазерной спектроскопии. В работе [11] сообщается о создании датчика, который может обеспечить высокий коэффициент усиления фотоакустического сигнала без необходимости прохождения лазерного луча через кварцевый камертон. В [12] представлен датчик лазерной спектроскопии на основе кварцевого

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ТГУ, тема номер FSWM-2025-0038.