

09.5;15

## **Микрорезонаторный интерференционный волоконно-оптический датчик относительной влажности воздуха**

© А.В. Чуренков

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный, Московская обл.  
E-mail: churenkov@mtu-net.ru

Поступило в Редакцию 18 марта 2013 г.

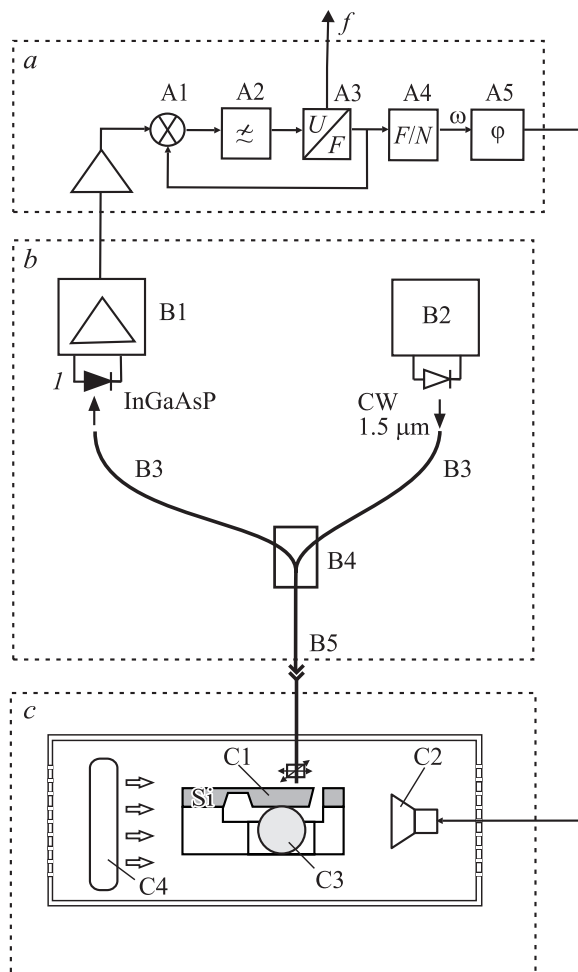
Разработан новый тип волоконно-оптического датчика относительной влажности воздуха на основе микромеханического кремниевого микрорезонатора и силикагеля. Выходной сигнал такого датчика в частотной форме малочувствителен к вариациям мощности лазерного источника и случайным затуханиям в волокне. При использовании чисто оптического возбуждения колебаний резонатора чувствительный элемент такого датчика будет полностью пассивным, так как не будет содержать электронных компонентов и цепей. Датчик показал высокую чувствительность при относительной влажности менее 75%, возможность работы при отрицательных температурах, низкую зависимость показаний от температуры воздуха. Зависимость массы влаги, адсорбированной силикагелем, от относительной влажности воздуха оказалась линейной, что упрощает калибровку датчика.

К настоящему времени разработано огромное многообразие волоконно-оптических датчиков (ВОД) [1]. В ряду этих исследований отдельное место занимают работы по ВОД, принцип действия которых основан на изменении резонансной частоты миниатюрного механического резонатора под действием измеряемого параметра [2]. Сам резонатор изготавливается методами анизотропного травления кремния или других полупроводниковых материалов. Выходной сигнал таких датчиков в частотной форме малочувствителен к изменениям мощности излучения лазерного источника и случайным затуханиям в волокне. Для детектирования колебаний резонатора часто используется волоконно-оптический интерферометр Фабри–Перо, образованный выходным торцом волокна и частично отражающей поверхностью резонатора. В этом случае чувствительность системы регистрации колебаний составляет

доли нанометра. Столь малая амплитуда колебаний резонатора может быть возбуждена чисто оптически модулированным излучением за счет фототермического эффекта [3]. При этом чувствительный элемент датчика получается полностью пассивным, так как он не содержит электронных цепей и компонентов и, следовательно, может быть использован в зоне повышенной взрывоопасности и сильных электромагнитных помех.

В данной статье рассматривается новый тип микрорезонаторного интерференционного ВОД относительной влажности воздуха. Разработывавшиеся ранее ВОД влажности основаны на изменении длины волны отраженного света или его интенсивности под действием измеряемого параметра [4]. Нами впервые описан способ измерения влажности воздуха по изменению частоты собственных колебаний кремниевого микрорезонатора с закрепленной на его подвижной части гранулы силикагеля. Силикагель — это один из лучших синтетических адсорбентов. Пористая структура взаимосвязанных пустот создает обширную удельную поверхность (до  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) и значительный объем пор ( $0.5\text{--}1.2 \text{ ml/g}$ ) с преобладанием пор диаметром от 5 до 15 nm. Силикагель может впитать из воздуха или других газов влагу, составляющую около 40% от собственного веса. При этом равновесное количество поглощенной влаги зависит от относительной влажности окружающего воздуха. Под действием адсорбированной из воздуха влаги изменяется масса гранулы силикагеля, что приводит к изменению частоты собственных колебаний механического резонатора. Такая конструкция позволила достигнуть высокой чувствительности и точности датчика при относительной влажности воздуха менее 75%. В пределах погрешности эксперимента изменения температуры не влияли на показания датчика. При этом измерение относительной влажности можно проводить и при отрицательных температурах. Зависимость массы влаги, адсорбированной силикагелем, от относительной влажности воздуха оказалась линейной, что упрощает калибровку датчика.

Схема установки показана на рис. 1. Излучение лазерного диода вводится в волоконный световод и через ответвитель передается к микрорезонатору. Часть излучения отражается от интерферометра Фабри–Перо, образованного торцом волокна и частично отражающей поверхностью резонатора, и попадает обратно в волокно. В результате фотодиод регистрирует интенсивность излучения, изменяющуюся периодически с частотой колебаний резонатора. Мы работали внутри



**Рис. 1.** Схема макета датчика. *a* — блок фазовой автоподстройки частоты: A1 — синхронный детектор, реализованный на аналоговых ключах, A2 — фильтр низкой частоты, A3 — генератор, управляемый напряжением, A4 — делитель частоты, A5 — модуль сдвига фазы. *b* — оптическая часть: B1 — фотоприемник, B2 — лазерный модуль, B3 — оптическое волокно, B4 — волоконный ответвитель, B5 — оптический разъем. *c* — чувствительный элемент: C1 — механический микрорезонатор, C2 — миниатюрный динамик, C3 — гранула силикагеля, C4 — вентилятор.

одной полосы интерферометра, так что амплитуда колебаний резонатора составляла примерно 1.8 длины волны света. При изменении относительной влажности воздуха от 0 до 100% частота собственных колебаний резонатора изменялась соответственно от 2.54 до 2.21 кГц. Частота резонатора при нулевой влажности составляла  $f_0 = 2.542$  кГц, а частота кремниевой структуры без силикагеля  $f_1 = 9.521$  кГц. Добротность была примерно равна 1000. Для увеличения быстродействия датчика внутри корпуса с чувствительным элементом был установлен вентилятор, который создавал поток воздуха вблизи резонатора. Резонансные колебания возбуждались акустически при помощи миниатюрного динамика.

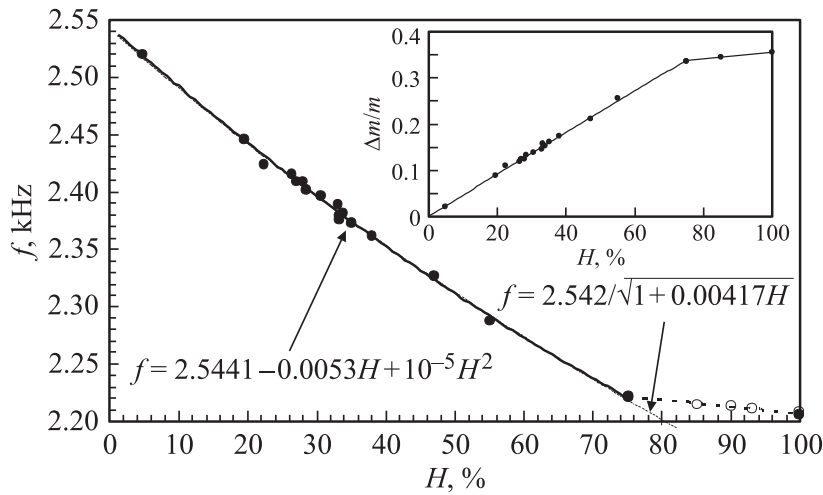
Чем больше относительная влажность воздуха, тем больше масса гранулы силикагеля, тем меньше частота собственных колебаний резонатора  $f$ :

$$f = f_0 \left( 1 + \frac{\Delta m}{m + m_1} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $f_0$  — частота резонатора при нулевой влажности,  $\Delta m$  — масса влаги, адсорбированная гранулой силикагеля,  $m_1$  — масса кремниевого подвижного элемента,  $m$  — масса гранулы силикагеля без влаги. Значение  $f_0$  легко получить из экспериментальных точек экстраполяцией к нулевой влажности. Измерив частоту  $f_1$  микроструктуры без силикагеля, легко оценить отношение массы адсорбированной влаги к массе гранулы силикагеля в чистом виде:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{(f_0/f)^2 - 1}{1 - (f_0/f_1)^2}. \quad (2)$$

Существует несколько автоматических способов определения резонансной частоты высокодобротной механической системы: 1) импульсное возбуждение колебаний с последующим определением частоты затухающих свободных колебаний; 2) шумовое возбуждение резонатора с последующим быстрым фурье-преобразованием выходного сигнала; 3) использование фазовой автоматической подстройкой частоты (ФАПЧ). Мы испытали способы 2 и 3, которые в силу высокой добротности резонатора позволяли отслеживать резонансную частоту с точностью около 0.1 Нз. При использовании ФАПЧ приходилось учитывать, что среднее расстояние между отражателями интерферометра (резонатором и торцом волокна) медленно изменялось, так что время



**Рис. 2.** Изучение чувствительности датчика.  $F$  — резонансная частота,  $H$  — относительная влажность воздуха. На вставке изображена зависимость изменения массы гранулы силикагеля от  $H$  (пересчет по формуле (2)).

от времени интерферометр выходил из линейного режима работы и амплитуда гармоники на резонансной частоте обращалась в ноль. Чтобы предотвратить прерывание генерации мы использовали двухканальный ФАПЧ, который работал как с первой гармоникой интерференционного сигнала, так и с его второй гармоникой.

На рис. 2 показаны результаты исследования чувствительности датчика. Экспериментальные точки были получены в разные дни, при различных влажностях, температурах и амплитудах колебаний резонатора. Чтобы установить соответствие между изменениями резонансной частоты и относительной влажностью воздуха, последняя определялась при помощи аспирационного психометра. При относительной влажности  $H$  менее 75% кривая хорошо описывается имеющей физический смысл формулой  $f = f_0(1 + 0.00416H)^{-1/2}$  (см. формулу (1)). Эта зависимость показана на рисунке тонкой сплошной линией. В пределах точности эксперимента гистерезис показаний датчика не наблюдался. Толстой сплошной линией показана другая аппроксимация экспериментальных точек:  $f = 2.5441 - 0.0053H + 10^{-5}H^2$ . Из нее видно, что

чувствительность датчика в области низкой и средней влажности составила примерно  $5.3 \text{ Hz}/\%$ . При относительной влажности более 75% происходило насыщение силикагеля влагой и чувствительность датчика резко уменьшалась (соответствующий участок кривой показан пунктирной линией). Точка, соответствующая 75% влажности воздуха, была получена в результате стандартной калибровки над насыщением раствором NaCl. Точки, соответствующие относительной влажности  $\sim 100\%$ , были сняты при температуре  $25^\circ\text{C}$  (черные кружки) и  $2^\circ\text{C}$  (светлые кружки). При этом резонансные частоты совпали в пределах точности эксперимента. Также на общую кривую ложились и точки, снятые при отрицательной температуре. Это указывает на низкую зависимость показаний датчика от температуры воздуха. При пересчете по формуле 2 резонансной частоты микроструктуры  $f$  на массу гранулы силикагеля оказалось, что при относительной влажности менее 75% масса поглощенной силикагелем влаги  $\Delta m$  линейно зависит от относительной влажности воздуха  $H$  (см. вставку к рис. 2). Ширина резонансной кривой была чуть больше 2 Hz. Даже визуально в ручном режиме резонансную частоту удавалось фиксировать с точностью около 0.1 Hz, что соответствует вариации относительной влажности 0.02%. При изменении влажности время установления резонатора на новой собственной частоте составило около 15 min.

Таким образом, в статье описан новый тип ВОД относительной влажности воздуха, основанный на изменении резонансной частоты кремниевой механической микроструктуры с прикрепленной к ней гранулой силикагеля под действием измеряемого параметра. Кремниевый микрорезонатор обладал высокой механической добротностью, что позволило достигнуть пороговую чувствительность датчика на уровне 0.02% относительной влажности воздуха. Масса влаги, адсорбированная силикагелем, оказалась зависящей линейно от относительной влажности воздуха, что упрощает калибровку датчика. В пределах точности эксперимента мы не обнаружили гистерезиса в показаниях датчика, а также зависимости его выходного сигнала от температуры окружающей среды. Впервые была разработана и использована двухканальная система ФАПЧ, которая позволяла поддерживать в системе колебания на резонансной частоте механической микроструктуры независимо от положения рабочей точки интерферометра.

## Список литературы

- [1] *Culshaw Brian, Kersey Alan* // J. Lightwave Technology. 2008. V. 26. N 9. P. 1064–1078.
- [2] *Егоров Ф.А., Никитов С.А., Потанов В.Т.* // „Фотон-Экспресс“ -Наука. 2005. № 6. С. 152–165.
- [3] *Churenkov A.V.* // Sensors and Actuators. A. 1993. V. 39. N 2. P. 141–148.
- [4] *Yeo T.L., Sun T., Grattan K.T.V.* // Sensors and Actuators. A: Physical. 2008. V. 144. Iss. 2(15). P. 280–295.