

УДК 681.7

**А.М. Минкин<sup>1,2</sup>, Л.А. Жикина<sup>2</sup>, Н.А. Медведева<sup>1</sup>, М.С. Котлячков<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup> Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

## **ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА НА БАЗЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ $Al_2O_3/Ta/SiO_2$**

В работе рассматриваются технологические и эксплуатационные характеристики волоконно-оптического датчика концентрации молекулярного водорода на основе интерферометра Фабри–Перо. Показана возможность регистрации концентрации водорода по деформации мембраны с осажденным на ее внешнюю поверхность слоем  $Al_2O_3/Ta/SiO_2$ . Осажденная пленка  $\alpha$ -тантала обеспечивает высокую диффузию водорода и позволяет создавать датчики с быстрым откликом к водороду, менее 10 с. Установлено практически полное отсутствие кросс-чувствительности датчика к температуре в диапазоне от 20 до 80 °С при давлении водорода 1 атм.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик, водород, интерферометр Фабри–Перо, тантал, кварцевое стекло, мембрана.

**A.M. Minkin<sup>1,2</sup>, L.A. Zhikina<sup>2</sup>, Medvedeva N.A<sup>1</sup>, M.S. Kotliachkov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company,  
Perm, Russian Federation

## **FIBER-OPTIC HYDROGEN CONCENTRATION SENSOR BASED ON THE FABRY–PEROT INTERFEROMETER, FABRICATED USING NANOSCALE LAYERS OF $Al_2O_3/Ta/SiO_2$**

The article discusses the technological and operational characteristics of a fiber-optic sensor of molecular hydrogen concentration based on the Fabry–Perot interferometer. The possibility of registering the hydrogen concentration by deformation of a membrane with an  $Al_2O_3/Ta/SiO_2$  layer deposited on its outside surface is shown. The deposited  $\alpha$ -tantalum film provides high diffusion of hydrogen, and allows you to create sensors with a fast response to hydrogen, less than 10s. The almost complete absence of cross-sensitivity of the sensor to temperature in the range from 20 °C to 80 °C at a hydrogen pressure of 1 atm.

**Keywords:** fiber-optic sensor, hydrogen, Fabry–Perot interferometer, tantalum, fused silica, membrane.

## **Введение**

В настоящее время все больше развитых стран переходят на использование водорода как в промышленности, так и в энергетике. Водород применяют в химической и нефтяной промышленности для производства аммиака, соляной кислоты, спиртов, гидроочистки нефтепродуктов. Водород как источник энергии может использоваться в виде водородных топливных элементов или смеси с другими топливами в различных транспортных средствах с двигателями внутреннего сгорания и газотурбинными двигателями [1]. Следует отметить существование серийно выпускаемых марок водородных автомобилей Toyota Mirai и Hyundai Nexo. Водород применяется не только для топливных элементов, но и для аккумуляторов энергии, например, никель-водородные аккумуляторные батареи, которые устанавливаются на космических аппаратах [2].

По сравнению с традиционными видами топлива водород взрывоопасен в широком диапазоне концентраций от 4,12 до 75 об.% (водородно-воздушная смесь) и от 4,1 до 96 об.% (водородно-кислородной смеси), что, примерно, в семь раз шире, чем у метана [3]. Кроме того, водород характеризуется высоким коэффициентом диффузии в воздухе ( $0,16 \text{ см}^2/\text{с}$ ), низкой энергией воспламенения ( $0,018 \text{ мДж}$ ), высокой теплотой сгорания ( $285,8 \text{ кДж/моль}$ ), а также высокой скоростью горения, чувствительностью к детонации и температурой воспламенения  $560 \text{ }^\circ\text{C}$  [4]. Поэтому обнаружение водорода имеет чрезвычайно важное значение для обеспечения безопасности при использовании в промышленности и повседневной жизни.

Для детектирования и мониторинга утечек водорода используют различные технологии обнаружения водорода: каталитическая, электрохимическая, механическая, акустическая, оптическая, основанная на сопротивлении, теплопроводности, работе выхода электрона [5]. Каталитические датчики и датчики теплопроводности являются надежными и характеризуются долговременной стабильностью. Электрохимические датчики и резистивные датчики демонстрируют высокую чувствительность, но низкую селективность. Однако стоит отметить, что перечисленные выше типы электрических датчиков чувствительны к электромагнитным помехам и с большей вероятностью могут вызвать воспламенение водородо-содержащих смесей из-за возможных искр в

зоне электрических контактов. Оптические датчики водорода отличаются собственной невосприимчивостью к электромагнитным помехам и возможностью распределенного и мультиплексного мониторинга, что делает их конкурентоспособными для широкого практического применения [6].

По методу измерения оптические датчики водорода можно разделить на четыре основных типа: датчики на основе модуляции интенсивности, датчики на основе волоконных решеток, датчики на основе поверхностного плазмонного резонанса и датчики на основе интерферометров [6, 7]. Каждый тип датчика имеет свои преимущества и недостатки. По сравнению с другими типами интерферометрический датчик водорода обладает более гибкой и простой структурой, а также высокой чувствительностью, точностью, хорошей воспроизводимостью [7]. Достигнутые параметры датчиков водорода на основе интерферометра Фабри–Перо приведены в таблице.

Характеристики датчиков водорода на основе интерферометра Фабри–Перо

Структура чувствительной к водороду пленки и ее толщина	Диапазон концентрации водорода	Чувствительность	Разрешение	Время отклика	Температурная чувствительность	Источники
Pd/MLG 3,1/5,6 нм	200 ppm – 20000 ppm	0,25 пм/ppm	20 ppm	18 с	1,4 пм/°C	[8]
графен/ Au/ Pd 2 /113 / 13 нм	0–4,5 %	290 пм при 4,5 %	1,5 ppm	2,88 с при 4,5 % 28,7 с при 1,5 %	10,2 пм/ °C от 25 до 100 °C	[9]
Pd 40–100 мкм	0– 10 %	1,44 нм/%,	500 ppm	185 с	1,3 нм/°C термокомпенсация ВБР	[10]
Pd 20 нм	0–8 %	25 пм/%	–	120 с	6,71 пм/°C	[11]
Pd/ Ni 50/2 нм	4,0 %	0,7 нм при 4 %	–	50 с	–	[12]

Дальнейшее улучшение характеристик датчиков водорода может быть достигнуто несколькими способами, включая использование новых сенсорных материалов и инновационных технологий изготовления.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию технологических и эксплуатационных характеристик металл-гидридного волоконно-оптического датчика концентрации молекулярного водорода на основе интерферометра Фабри–Перо.

### Экспериментальная часть

#### Описание конструкции датчика

Схема предлагаемого датчика концентрации водорода на основе интерферометра Фабри–Перо (ИФП) с осажденным на внешнюю поверхность чувствительной мембраны слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}/\text{SiO}_2$  показана на рис. 1.

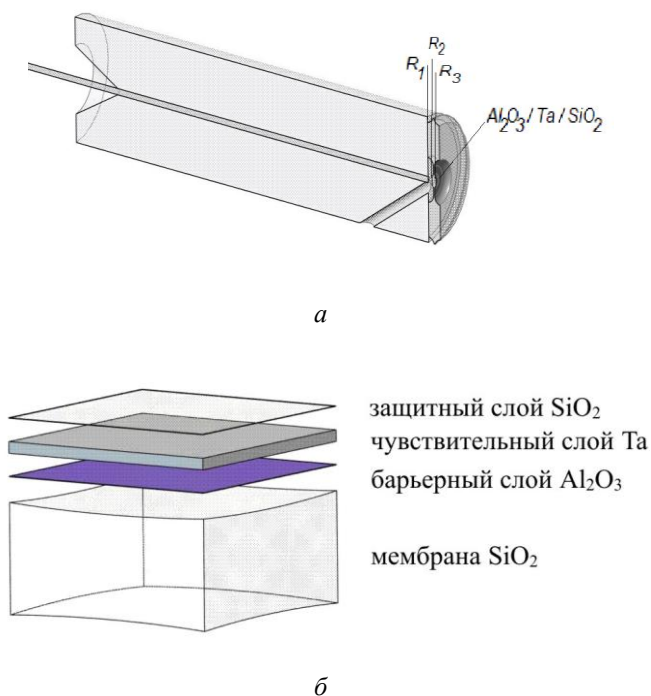


Рис. 1. Схематическое изображение чувствительного элемента датчика концентрации водорода (а) и многослойной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}/\text{SiO}_2$  с указанием функционального назначения слоев (б)

Датчик имеет три отражающих поверхности с коэффициентами  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  соответственно, как показано на рис. 1 *a*, которые образуют три зазора. Первый зазор – воздушный, состоит из  $R_1$  и  $R_2$ . Второй зазор образован  $R_2$  и внешней поверхностью мембраны с нанесенным покрытием  $R_3$ . Третий зазор состоит из  $R_1$  и  $R_3$  и имеет самую большую длину. На основании теории многолучевой интерференции интенсивность трехлучевой интерференции  $I_r$  в интерферометре Фабри–Перо для волоконно-оптического датчика мембранного типа может быть записана так [13]:

$$I_r = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_1 R_2 R_3 - 2\sqrt{R_1 R_2} (R_3 + 1) \cos(2\beta_2) - 2\sqrt{R_2 R_3} (R_1 + 1) \cos(2\beta_3) +}{1 + R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3 - 2\sqrt{R_1 R_2} (R_3 + 1) \cos(2\beta_2) - 2\sqrt{R_2 R_3} (R_1 + 1) \cos(2\beta_3) +} \\ + \frac{2\sqrt{R_1 R_3} \cos 2(\beta_2 + \beta_3) + 2\sqrt{R_1 R_3} R_2 \cos 2(\beta_2 - \beta_3)}{+ 2\sqrt{R_1 R_3} \cos 2(\beta_2 + \beta_3) + 2\sqrt{R_1 R_3} R_2 \cos 2(\beta_2 - \beta_3)},$$

где  $\beta_2$  и  $\beta_3$  представляют изменение фазы в воздушном зазоре длиной  $d_2$  и стеклянной мембране толщиной  $d_3$ , определяемые формулами:

$$\beta_2 = \frac{2\pi n_2 d_2}{\lambda} \quad \text{и} \quad \beta_3 = \frac{2\pi n_1 d_3}{\lambda},$$

где  $n_1 = 1,45$  и  $n_2 = 1$  – показатели преломления кварцевого стекла и воздуха соответственно,  $\lambda$  – длины волны излучения.

Концентрацию водорода можно определить по изменению размера воздушного зазора  $\Delta d_2$  ИФП, обусловленного взаимодействием чувствительной пленки тантала с водородом. При взаимодействии водорода с тонкопленочной структурой на основе Та молекулы  $H_2$  адсорбируются и затем диссоциируют на поверхности (рис. 2*a*). Диссоциированные атомы водорода диффундируют в пленку тантала, образуют гидриды типа  $TaH_x$ , что вызывает расширение кристаллической решетки Та и, как следствие, приводит к деформации чувствительной мембраны и изменению воздушного зазора [7]:

$$\Delta d_2 = -\Delta L_{\text{film}} = -\Delta L_{\text{film}} \cdot \varepsilon_{\text{Ta}},$$

где  $\varepsilon_{\text{Ta}}$  – деформация в пленке Та,  $L$  – толщина пленки Та.

Тантал является многообещающим кандидатом в качестве чувствительного к водороду материала. Гидрид тантала  $TaH_x$  имеет

большое окно растворимости  $0 < x \leq 0,7$  при  $T_{\text{crit}} > 61$  °С в пределах одной термодинамической фазы, как показано на рис. 2 б, что, таким образом, позволяет обеспечить широкий диапазон измерения концентрации водорода без наблюдения гистерезиса. Кроме того, тантал имеет объемно центрированную кубическую (ОЦК) структуру, которая обеспечивает высокую диффузию водорода, что позволит создавать датчики с быстрым откликом к водороду. Выражение диффузии водорода в тантал  $D(\text{H}_2/\text{Ta})$ , применяемое в диапазоне температур 253–573 К [14], представлено ниже:

$$D(\text{H}_2 / \text{Ta})(\text{м}^2 / \text{с}) = (4,4 \cdot 10^{-8}) \exp\left(\frac{-1620}{T}\right).$$

### Описание технологий изготовления

Волоконно-оптический датчик концентрации водорода на основе интерферометра Фабри–Перо был изготовлен с использованием одномодового оптического волокна с сердцевинной из нелегированного кварцевого стекла в защитном полиимидном покрытии, которое разработано и серийно выпускается ПАО «ЛНППК». Характеристики и результаты исследования оптического волокна представлены в работе [15]. Мембранный элемент датчика водорода изготовлен из пластин  $\varnothing 100$  мм кварцевого стекла марки КУ-1 по технологии поверхностной микрообработки. Внешний вид чувствительного элемента датчика концентрации водорода представлен на рис. 3.



Рис. 2. Стадии реакции между молекулами газообразного водорода и поверхностью пленки Та (а). Диаграмма состояния системы Та–Н<sub>2</sub> (б) [13]

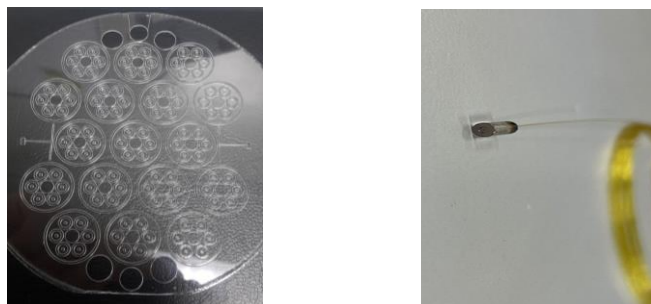


Рис. 3. Внешний вид изготовленного чувствительного элемента датчика концентрации водорода

Технология поверхностной микрообработки кварцевого стекла базируется на основных МЭМС-технологиях: вакуумное осаждение защитных слоев, фотолитография и травление материала. Данный класс технологических процессов реализован на ПАО «ПНППК» и применяется для массового создания маятникового компенсационного акселерометра типа Q-flex [16]. Осаждение барьерного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и защитного  $\text{SiO}_2$  слоев осуществлялось методом электронно-лучевого испарения на установке Satisloh MC-380-H. В качестве исходного материала для испарения использовались гранулы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  чистотой 99,9 %. Пленка тантала была получена методом магнетронного распыления мишени из тантала марки ТВЧ (чистотой 99,95 %) в плазме аргона (чистотой 99,999 %) на универсальной вакуумной установке НИКА-2012ТН. Параметры осаждения пленки Ta: мощность магнетронного разряда – 750 Вт, расход рабочего газа (аргона) – 10 л/ч, время процесса – 1500 с, температура камеры – без нагрева.

Для соединения деталей чувствительного элемента из кварцевого стекла использовалась золь-гель – технология, которая позволяет обеспечить прочность соединения ( $7,4 \pm 1,2$ ) Н по всей площади сопрягаемых деталей за счет образования промежуточного стеклообразного слоя [17].

### *Методы исследования*

Схематическое изображение экспериментальной установки показано на рис. 4. Опрос волоконно-оптического датчика концентрации водорода производился при помощи четырехканального оптического интеррогатора ASTRO A312, который регистрирует спектральную

зависимость опрашиваемого датчика в области длин волн 1,5–1,6  $\mu\text{m}$  (разрешение – 5 пм, количество точек  $N = 20\,000$ ). Для высокоточной демодуляции сигнала датчика  $I(\lambda)$  использовался фазовый алгоритм обработки регистрируемых интерференционных колебаний.

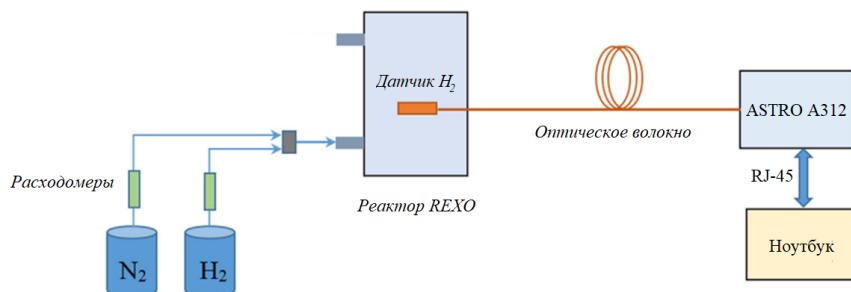


Рис. 4. Экспериментальная установка для испытаний чувствительного элемента датчика концентрации водорода

Чувствительный элемент датчика помещался внутрь реактора типа М-серии (Rexo) через оптоволоконный разъем. Давление водорода в камере контролировалось при помощи расходомеров по  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ .

Морфологию поверхности пленки исследовали атомно-силовым микроскопом Ntegra Prima (NT-MDT BV, Нидерланды) с использованием кремниевых зондов с радиусом острия  $\sim 2$  нм.

Исследование фазового состава и текстуры пленки проводилось методом рентгеновской дифракции на дифрактометре Bruker D8 AdvanceEco с использованием  $\text{Co-K}\alpha_{1,2}$  излучений (фильтр-Fe). Сканирование проводилось в диапазоне углов  $2\theta$  от  $15$  до  $120^\circ$  при фокусировке по Брэггу–Брентано.

Измерение толщины пленок и оценка уровня механических напряжений в микромеханических балках, зафиксированных с одной стороны [13], проводилось на оптическом профилометре Zygo NewView 7300 с использованием объектива 5-кратного увеличения.

## Результаты и обсуждение

### *Микроструктура тонкой пленки тантала*

Исследования чувствительной к водороду пленки тантала толщиной 500 нм показало, что его поверхность не имеет выраженной шероховатости  $\text{RMS} = (1,9 \pm 0,5)$  нм. На рис. 5 представлены АСМ-изображение и профилограмма поверхности пленки Та. Из анализа



данных АСМ установлено, что средний латеральный размер кристаллитов составляет  $(45 \pm 5)$  нм. Результаты измерений внутренних механических напряжений (напряжений 1-го рода) в полученной пленке тантала составляют  $(-27,5 \pm 5,2)$  МПа.

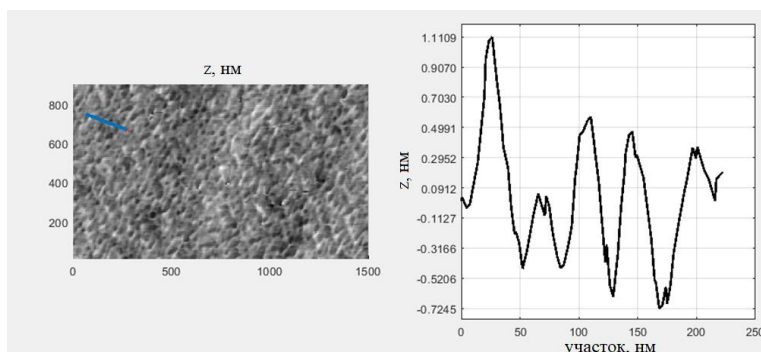


Рис. 5. АСМ-изображение и профилограмма поверхности пленки тантала

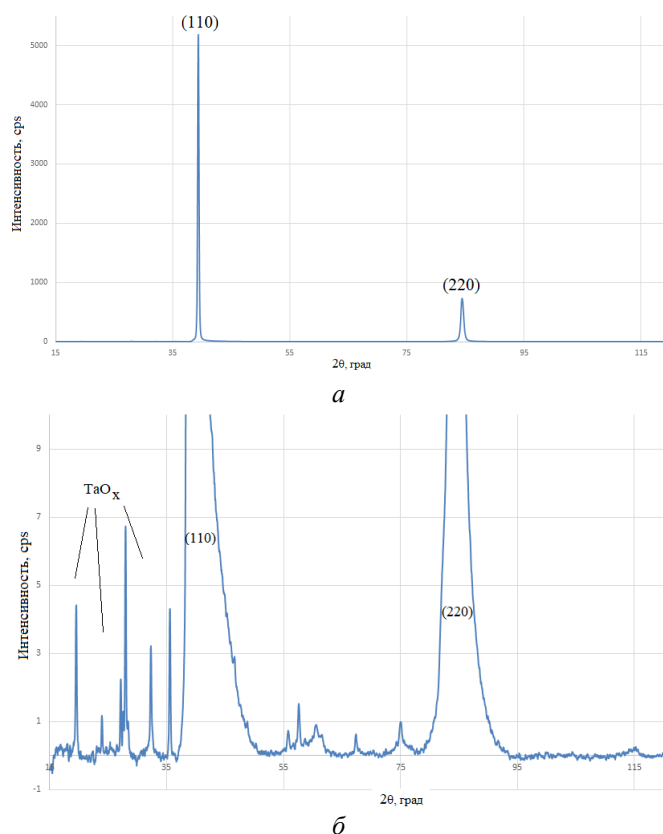


Рис. 6. Рентгенограмма пленки тантала, осажденной на подложку из кварцевого стекла

Основные результаты рентгеноструктурных исследований полученных нами пленок тантала приведены на рис. 6. На рентгенограмме идентифицированы рефлексы (110) и (220), свидетельствующие о том, что в пленке основной является ОЦК-фаза  $\alpha$ -тантала. При этом наблюдается слабовыраженное присутствие фаз  $TaO_x$ , представленное на рис. 6б. Полученные результаты также свидетельствуют о возникновении в пленке тантала преимущественной ориентации (110).

### ***Влияние давления водорода на чувствительность датчика***

На представленном ниже рис. 7 показана динамика отклика датчика с нанесенной пленкой тантала к различному давлению водорода, создаваемому в реакторе Рехо. По результатам испытаний определено среднее значение чувствительности датчика к водороду равное  $(0,2223 \pm 0,0084)$  рад/атм. Отмечено достаточно низкое значение времени отклика, менее 10 с.

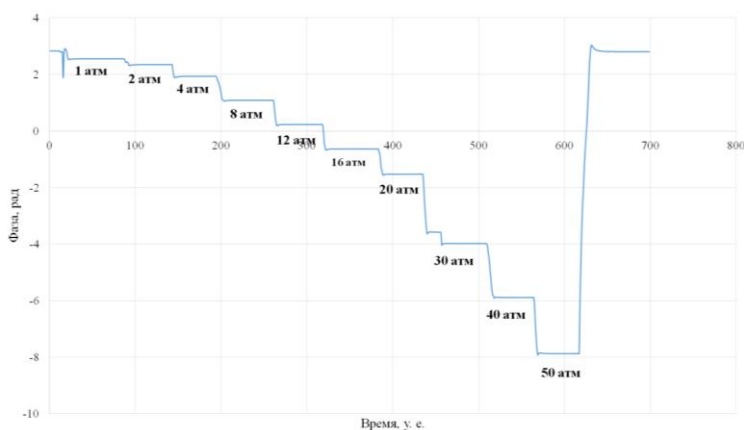


Рис. 7. Испытание чувствительного элемента датчика концентрации водорода при напуске водорода под давлением от 1 до 50 атм при температуре 20 °С

### ***Влияние температуры на чувствительность датчика***

Дополнительно были проведены исследования влияния изменения температуры на показания датчика водорода. Результаты испытаний приведены на рис. 8 и 9. Отмечено отсутствие детектируемого влияния температуры в диапазоне от 20 до 80 °С при давлении водорода 1 атм на величину чувствительности датчика к водороду.

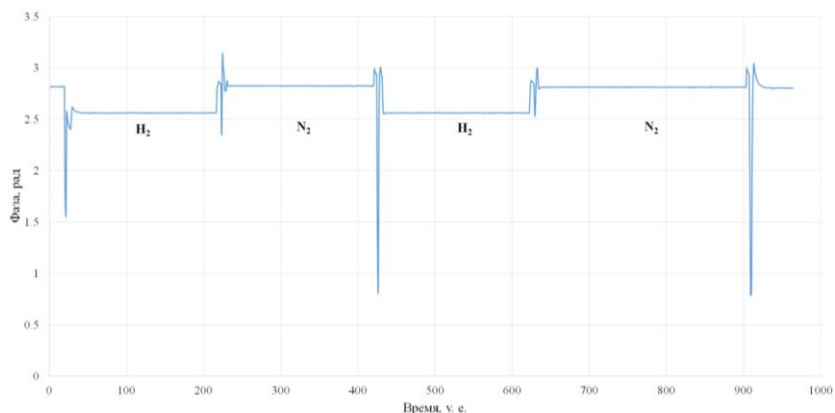


Рис. 8. Испытание чувствительного элемента датчика концентрации водорода при напуске азота и водорода до установления давления 1 атм при температуре 20 °С

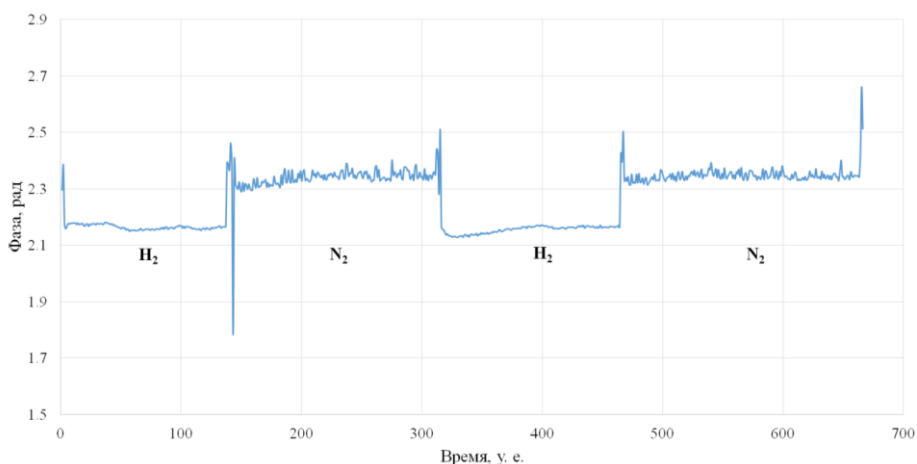


Рис. 9. Испытание чувствительного элемента датчика концентрации водорода при напуске азота и водорода до установления давления 1 атм при температуре 80 °С

### Заключение

В данной статье представлен волоконно-оптический датчик концентрации молекулярного водорода на основе интерферометра Фабри–Перо. Кварцевая мембрана с нанесенным на ее поверхность слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}/\text{SiO}_2$  позволила обеспечить достаточно низкое значение времени отклика датчика к изменению содержания водорода в среде менее 10 с, что, вероятно, связано с ОЦК-структурой полученной пленки тантала. Присутствие в пленке фаз  $\text{TaO}_x$ , которое было зарегистрировано при помощи рентгенофазового анализа, указывает на потенциальную

возможность дополнительного повышения скорости отклика датчика. В диапазоне давлений водорода от 1 до 50 атм. среднее значение чувствительности датчика к водороду составило  $(0,2223 \pm 0,0084)$  рад/атм. Кроме того, установлено практически полное отсутствие кросс-чувствительности к температуре в диапазоне от 20 до 80 °С при давлении водорода 1 атм.

### Список литературы

1. Травкина А.И., Колин С.А. Альтернативные виды моторного топлива // Вестник международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 14–20.
2. Месяц Г.А., Прохоров М.Д. Водородная энергетика и топливные элементы // Вестник российской академии наук. – 2004. – Т. 74. – № 7. – С. 579– 597.
3. Yousef SH Najjar, S. Mashareh Hydrogen Leakage Sensing and Control: (Review) // Biomed J. Sci. & Tech. Res. – 2019. – Vol. 5. – No. 21. – P. 16228–16240. DOI: 10.26717/BJSTR.2019.21.003670
4. Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors / Y. Zhang, H. Peng, X. Qian, Y. Zhang, G. An & Y. Zhao // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2017. – No. 244. – P. 393–416. DOI: 10.1016/j.snb.2017.01.004
5. Hydrogen sensors – A review / T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black & U. Banach // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2011. – No. 157. – P. 329–352. DOI: 10.1016/j.snb.2011.04.070
6. Chen K., Yuan D., Zhao Y. Review of optical hydrogen sensors based on metal hydrides: Recent developments and challenges // Optics & Laser Technology. – 2021. No. 137. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106808
7. A compact hydrogen sensor based on the fiber-optic Fabry-Perot interferometer / X. Zhou, F. Ma, H. Ling, B. Yu, W. Peng & Q. Yu // Optics & Laser Technology. – 2020. – No. 124. – 105995. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105995
8. High-sensitivity and fast-response fiber-tip Fabry-Pérot hydrogen sensor with suspended palladium-decorated graphene / Jun Ma, Yanglin Zhou, Xue Bai, Kai Chen and Bai-Ou Guan // Nanoscale. – 2019. No. 11. – 15821. DOI: 10.1039/c9nr04274a

9. Fiber optic hydrogen sensor based on a Fabry– Perot interferometer with a fiber Bragg grating and a nanofilm / Junxian Luo, Shen Liu, Peijing Chen, Shengzhen Lu, Qiang Zhang, Yanping Chen, Bin Du, Jian Tang, Jun He, Changrui Liao and Yiping Wang // *Lab Chip*. – 2021. – No. 21. – P. 1752–1758. DOI: 10.1039/d1lc00012

10. A compact hydrogen sensor based on the fiber-optic Fabry-Perot interferometer / Xinlei Zhou, Fengxiang Ma, Haitao Ling, Binjun Yu, Wei Peng, Qingxu Yu // *Optics and Laser Technology*. – 2020. – No. 124. – P.105995. DOI:10.1016/j.optlastec.2019.105995

11. Wang Fabry-Perot Interferometer Sensor Fabricated by Femto-second Laser for Hydrogen Sensing / M. Wang, M. Yang, J. Cheng, C.R. Guilin Zhang, D. N. Liao // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2012. – No. 25(8). – P. 713–716. DOI:10.1109/LPT.2013.2241421

12. High finesse interferometric hydrogen sensor based on fiber-optic Fabry-Perot cavity modulations / Young Ho Kim, Chanki Lee, Ji Hey Kwon, Yong-Tak Lee, Byeong Ha Lee // *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*. 2016. – Vol. 8421. – 84216D-1. DOI: 10.1117/12.975120

13. Optical hydrogen sensing beyond palladium: Hafnium and tantalum as effective sensing materials / L.J. Bannenberg, C. Boelsma, H. Schreuders, S. Francke, N.J. Steinke, A.A. van Well, B. Dam // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2019. – No. 283. P. 538–548. DOI:10.1016/j.snb.2018.12.029

14. Evaluation of tantalum-based materials for hydrogen separation at elevated temperatures and pressures / K.S. Rothenberger, B.H. Howard, R.P. Killmeyer, A.V. Cugini, R.M. Enick, F. Bustamante, M.V. Ciocco, B.D. Morreale, R.E. Buxbaum // *Journal of Membrane Science*. – 2003. – No. 218(1-2). – P. 19–37. DOI:10.1016/s0376-7388(03)00134-0

15. Опыт разработки термостойкого, радиационно-стойкого и водородостойкого оптического волокна / И.С. Азанова, Д.И. Шевцов, О.Л. Вохмянина, И.Д. Саранова, А.Н. Смирнова, М.И. Булатов, Е.А. Пospelова, Ю.О. Шаронова, Т.В. Димакова, П.Ф. Кашайкин, А.Л. Томашук, А.Ф. Косолапов, С.Л. Семёнов // *Фотоника*. – 2019. – Т. 13. – № 5. – С. 444–450. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.5.444.450

16. Минкин А.М. Технология изготовления чувствительного элемента кварцевого акселерометра методом объемной микрообработки // *Прикладная фотоника*. – 2019. – Т. 6. – № 3–4. – С. 147–159.

17. Жикина Л.А. Особенности соединения изделий из кварцевого стекла // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. – 2021. – №3. – С. 115–123. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.03.10

### References

1. Travkina A.I., Kolin S.A. Al'ternativnye vidy motornogo topliva [Alternative types of motor fuel]. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii nauk ekologii i bezopasnosti zhiznedeiatel'nosti*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 14-20.

2. Mesiats G.A., Prokhorov M.D. Vodorodnaia energetika i toplivnye elementy [Hydrogen energy and fuel cells]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 2004, vol. 74, no. 7, pp. 579-597.

3. SH Najjar Yousef, Mashareh S. Hydrogen Leakage Sensing and Control: (Review). *Biomed J. Sci. & Tech. Res.*, 2019, vol. 5, no. 21, pp. 16228-16240. DOI: 10.26717/BJSTR.2019.21.003670

4. Zhang Y., Peng H., Qian X., Zhang Y., An G., Zhao Y. Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, no. 244, pp. 393-416. DOI: 10.1016/j.snb.2017.01.004

5. Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. Hydrogen sensors - A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, no. 157, pp. 329-352. DOI: 10.1016/j.snb.2011.04.070

6. Chen K., Yuan D., Zhao Y. Review of optical hydrogen sensors based on metal hydrides: Recent developments and challenges. *Optics & Laser Technology*, 2021, no. 137, pp. 1-21. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106808

7. Zhou X., Ma F., Ling H., Yu B., Peng W., Yu Q. A compact hydrogen sensor based on the fiber-optic Fabry-Perot interferometer. *Optics & Laser Technology*, 2020, no. 124, 105995. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105995

8. Ma Jun, Zhou Yanglin, Bai Xue, Chen Kai, Guan Bai-Ou. High-sensitivity and fast-response fiber-tip Fabry-Pérot hydrogen sensor with suspended palladium-decorated grapheme. *Nanoscale*, 2019, no. 11, 15821. DOI: 10.1039/c9nr04274a

9. Luo Junxian, Liu Shen, Chen Peijing, Lu Shengzhen, Zhang Qiang, Chen Yanping, Du Bin, Tang Jian, He Jun, Liao Changrui, Wang Yiping. Fiber optic hydrogen sensor based on a Fabry-Perot interferometer with a fiber Bragg grating and a nanofilm. *Lab Chip*, 2021, no. 21, pp. 1752-1758. DOI: 10.1039/d1lc00012

10. Zhou Xinlei, Ma Fengxiang, Ling Haitao, Yu Binjun, Peng Wei, Yu Qingxu. A compact hydrogen sensor based on the fiber-optic Fabry-Perot interferometer. *Optics and Laser Technology*, 2020, no. 124, 105995 p. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105995

11. Wang M., Yang M., Cheng J., G. Zhang, C.R. Liao, D.N. Wang. Fabry-Perot Interferometer Sensor Fabricated by Femtosecond Laser for Hydrogen Sensing. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, no. 25 (8), pp. 713-716. DOI: 10.1109/LPT.2013.2241421

12. Young Ho Kim, Chanki Lee, Ji Hey Kwon, Yong-Tak Lee, Byeong Ha Lee. High finesse interferometric hydrogen sensor based on fiber-optic Fabry-Perot cavity modulations. // *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2016, vol. 8421, 84216D-1. DOI: 10.1117/12.975120

13. Bannenberg L.J., Boelsma C., Schreuders H., Francke S., Steinke N.J., Van Well A.A., Dam B. Optical hydrogen sensing beyond palladium: Hafnium and tantalum as effective sensing materials. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, no. 283, pp. 538-548. DOI: 10.1016/j.snb.2018.12.029

14. Rothenberger K.S., Howard B.H., Killmeyer R.P., Cugini A.V., Enick R.M., Bustamante F., Ciocco M.V., Morreale B.D., Buxbaum R.E. Evaluation of tantalum-based materials for hydrogen separation at elevated temperatures and pressures. *Journal of Membrane Science*, 2003, no. 218 (1-2), pp. 19-37. DOI: 10.1016/s0376-7388(03)00134-0

15. Azanova I.S., Shevtsov D.I., Vokhmianina O.L., Saranova I.D., Smirnova A.N., Bulatov M.I., Pospelova E.A., Sharonova Iu.O., Dimakova T.V., Kashaikin P.F., Tomashuk A.L., Kosolapov A.F., Semenov S.L. Opyt razrabotki termostoikogo, radiatsionno-stoikogo i vodorodostoikogo opticheskogo volokna [Experience in the development of heat-resistant, radiation-resistant and hydrogen-resistant optical fiber]. *Fotonika*, 2019, vol. 13, no. 5, pp. 444-450. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.5.444.450

16. Minkin A.M. Tekhnologiya izgotovleniia chuvstvitel'nogo elementa kvartsevogo akselerometra metodom ob'emnoi mikroobrabotki [Manufacturing technology of the quartz accelerometer sensing element by volumetric micro-processing]. *Prikladnaia fotonika*, 2019, vol. 6, no. 3-4, pp. 147-59.

17. Жикина Л.А. Особенности соединения изделий из кварцевого стекла [Features of the connection of quartz glass products]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2021, no. 3, pp. 115-123. DOI: 10.15593/2409-5125/2021.03.10

## **Сведения об авторах**

### **МИНКИН А.М.**

e-mail: *minkin.90@gmail.com*

Старший преподаватель кафедры «Физической химии» ФГАОУ ВО ПГНИУ, начальник отдела ПАО «ПНППК», Пермь, Россия

### **ЖИКИНА Л.А.**

e-mail: *lusyzh@gmail.com*

Аспирант кафедры «Охрана окружающей среды» ФГАОУ ВО «ПНИПУ», начальник лаборатории ПАО «ПНППК», Пермь, Россия

### **МЕДВЕДЕВА Н.А.**

e-mail: *nata-kladova@yandex.ru*

И.о. заведующего кафедрой физической химии ПГНИУ, Заведующий лабораторией особо чистых материалов для фотоники ПГНИУ, Пермь, Россия,

### **КОТЛЯЧКОВ М.С.**

e-mail: *mxmktlchkv@gmail.com*

Магистр кафедры «Нанотехнологии и микросистемная техника» ФГАОУ ВО «ПГНИУ», инженер-исследователь ПАО «ПНППК», Пермь, Россия

**Финансирование:** исследования выполнено при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2023 г.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 20.02.2023

**Одобрена:** 24.01.2023

**Принята к публикации:** 27.02.2023

## **About the authors**

### **MINKIN A.M.**

e-mail: *minkin.90@gmail.com*

Senior Lecturer of the Physical Chemistry Department, PSNRU, Head of Department, PJSC PNPPC, Perm, Russian Federation

### **ZHIKINA L.A.**

e-mail: *lusyzh@gmail.com*

Graduate student of Department of «Environmental Protection» at Perm National Research Polytechnic University, Head of Laboratory at Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russian Federation

### **MEDVEDEVA N.A.**

e-mail: *nata-kladova@yandex.ru*

Acting Head of the Department of Physical Chemistry at Perm State National Research University, Head of the Laboratory for High-Purity Materials for Photonics, Perm, Russian Federation

### **KOTLIACHKOV M.S.**

e-mail: *mxmktlchkv@gmail.com*

Master of the Nanotechnology and Microsystem Engineering Department, PSNRU, Research Engineer, PJSC PNPPC, Perm, Russian Federation



**Funding:** The research was supported by the Perm Research and Education Centre for Rational Use of Subsoil, 2023.

**Conflict of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 20/02/2023

**Approved:** 24/02/2023

**Accepted for publication:** 27/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Волоконно-оптический датчик концентрации водорода на базе интерферометра Фабри–Перо, изготовленный с использованием наноразмерных слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}/\text{SiO}_2$  / А.М. Минкин, Л.А. Жикина, Н.А. Медведева, М.С. Котлячков // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 25–41.

Please cite this article in English as: Minkin A.M., Zhikina L.A., Medvedeva N.A., Kotliachkov M.S. Fiber-optic hydrogen concentration sensor based on the Fabry–Perot interferometer, fabricated using nanoscale layers of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}/\text{SiO}_2$  // Applied photonics, 2023, no. 2, pp. 25-41.