

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ–ПЕРО И ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ¹

© 2020 г. К. М. Фадеев^{a,b,*}, Д. Д. Ларионов^a, Л. А. Жикина^{a,b},
А. М. Минкин^{a,b}, Д. И. Шевцов^{a,b}

^a Пермская научно-производственная приборостроительная компания
Россия, 614990, Пермь, ул. 25 Октября, 106

^b Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

*e-mail: FadeevKM@pnppk.ru

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.

После доработки 23.03.2020 г.

Принята к публикации 25.03.2020 г.

Представлен датчик одновременного измерения давления и температуры, выполненный полностью из кварцевых компонентов и с использованием интерферометра Фабри–Перо и волоконной брэгговской решетки (в.б.р.). Такая комбинация позволяет одновременно измерять температуру и давление, а также снизить вклад температуры в измерение давления. Чувствительным элементом является мембрана из кварцевого стекла, выполненная травлением. Чувствительность датчика к давлению составляет 50 нм/бар, а к температуре 4.6 нм/°С со стороны интерферометра Фабри–Перо и 10 пм/°С со стороны в.б.р. Показано использование в.б.р. в качестве термокомпенсирующего элемента.

DOI: 10.31857/S003281622005002X

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические датчики широко используются для измерения различных физических величин. Измерение температуры и давления в экстремальных условиях окружающей среды является областью, где волоконно-оптические датчики находят свое применение и постепенно заменяют менее эффективные электрические датчики благодаря таким свойствам, как взрыво- и пожаробезопасность, невосприимчивость к электромагнитному излучению, коррозионная стойкость, высокая температуростойкость, высокая чувствительность, малые габариты и вес.

Датчик на основе волоконной брэгговской решетки является одним из универсальных волоконно-оптических датчиков температуры и уже хорошо себя зарекомендовал для применения в различных областях [1, 2]. Волоконная брэгговская решетка (в.б.р.) представляет собой периодическую структуру показателя преломления в

сердцевине оптического волокна (о.в.). Выходной сигнал в.б.р. зависит от деформации и температуры:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda(kv + \alpha\Delta T),$$

где k – коэффициент тензочувствительности, α – коэффициент температурной чувствительности, n_{eff} – эффективный показатель преломления, λ_B – длина отраженной волны (брэгговская длина волны), Λ – период решетки, v – механическая деформация, ΔT – изменение температуры.

Таким образом, в.б.р. может являться чувствительным элементом и датчика температуры, и датчика давления. Наиболее важным свойством в.б.р. является узкополосное отражение оптического излучения, относительная спектральная ширина которого зависит от физической длины решетки. Одним из главных преимуществ в.б.р. является возможность ее мультиплексирования. Это значит, что на один канал датчика можно установить несколько в.б.р., измеряя значение температуры и деформации в разных точках пространства. В случае использования оптического волокна с в.б.р. в качестве датчика давления, оно может быть за-

¹ Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020” (<http://or-2020.permsc.ru/>, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

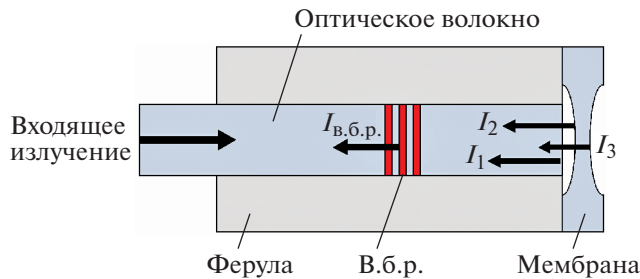


Рис. 1. Схема чувствительного элемента датчика давления и температуры.

креплено на мембране, которая прогибается под действием внешнего давления [3–5]. Однако такие датчики обладают высокой чувствительностью к температуре [6], невысокой чувствительностью к давлению и неприменимы для областей, где требуются миниатюрные размеры датчика, так как в.б.р. имеет размеры около 1 см [7].

Для измерения давления с высокими точностью, чувствительностью и разрешением применяются датчики на основе интерферометра Фабри–Перо [8, 9]. Чувствительный элемент таких датчиков представляет собой интерферометр Фабри–Перо, зеркалами которого являются сколотое оптическое волокно и перпендикулярно закрепленная мембрана.

Схема датчика и распространения излучения в нем представлена на рис. 1. Обратные отражения от торца о.в., внутренней и внешней поверхностей мембраны возвращаются в систему опроса, где взаимодействуют между собой и формируют на фотоприемнике интерференционную картину. Для трехлучевого низкокогерентного интерферометра она формируется по уравнению:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) - 2\sqrt{I_2 I_3} \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) + 2\sqrt{I_3 I_1} \cos\left(\frac{4\pi(L + nd)}{\lambda}\right),$$

где I_1 , I_2 , I_3 – интенсивность света от отражений торца о.в., внутренней и внешней поверхности мембраны, L – база интерферометра, d – толщина мембраны, n – показатель преломления материала мембраны, λ – длина волны излучения.

По уравнению видно, что вид интерференционной картины зависит от базы интерферометра L – длины воздушного зазора между торцом о.в. и поверхностью мембраны, а также от толщины стекла мембраны d . При воздействии внешнего давления происходит прогиб мембраны, вследствие чего изменяется база интерферометра L . Из-за этого происходит изменение периода интерференционной картины, вследствие чего можно наблюдать общее ее смещение. Прогиб мембраны

под воздействием давления можно описать выражением [10]:

$$\Delta L = \frac{3(1 - \mu^2)R^4}{16Ed^3} \Delta P,$$

где R и d – радиус и толщина мембраны, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

Датчик на основе интерферометра Фабри–Перо также реагирует и на температуру. Для исключения температурного вклада необходимо использовать датчик температуры. Комбинация в.б.р. в качестве датчика температуры и интерферометра Фабри–Перо в качестве датчика давления позволяет одновременно измерять давление и температуру.

ОПИСАНИЕ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Схематично устройство датчика представлено на рис. 1. Упругая мембрана и ферула (капилляр) выполнены из кварцевого стекла КУ-1. Для изготовления мембраны применялись методы объемной микрообработки стекла, включающие нанесение защитных слоев, формирование структур при помощи фотолитографии и химического травления в растворе на основе фтороводородной кислоты. Толщина тонкой части мембраны составляла 50 ± 1 мкм.

Особенностью предлагаемой конструкции является использование бесклевого соединения стеклянных деталей при помощи эфира ортокремниевой кислоты. Образующийся в процессе соединения слой диоксида кремния обеспечивает прочное и герметичное соединение.

Оптический спектр датчика представлен на рис. 2. Период интерференционной картины определяется базой интерферометра – расстоянием между торцом о.в. и внутренней поверхностью мембраны. База интерферометра в такой конструкции составляет около 200 мкм. По пику в.б.р. можно определить текущую температуру датчика, а по изменению интерференционной картины – оказываемое на датчик давление.

Длина базы интерферометра определяется по оптическому сигналу интерферометра:

$$L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)},$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн, отличающиеся по фазе на 2π .

Смещение пика в.б.р. от температуры происходит линейно по заранее определенному закону. Используя коэффициенты k_T , k_P , k_{FBG} , можно составить уравнение датчика в матричной форме [11]:

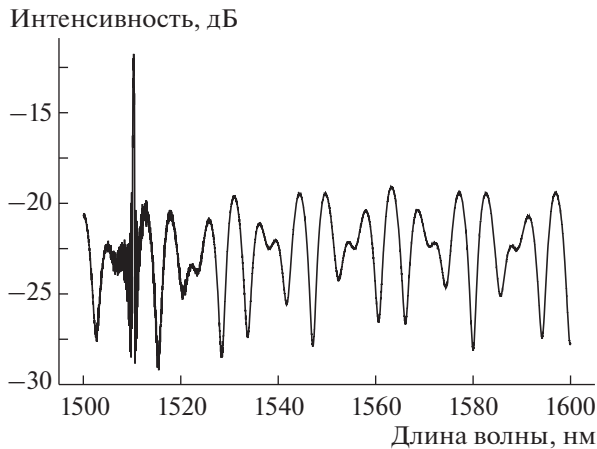


Рис. 2. Сигнал датчика давления и температуры.

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_{FBG} \\ k_P & k_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}.$$

ЭКСПЕРИМЕНТ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В эксперименте датчик давления и температуры подключался к анализатору сигналов оптических датчиков Astro A320 (ООО “Инверсия-С”, Россия). Для определения чувствительности датчика к давлению использовалось гидравлическое устройство сравнительной калибровки (ООО “Альфапаскаль”, Россия). В системе стоял контрольный манометр Wika CPG1000 (Wika Co., Германия), по которому определялось воздействующее на датчик давление. Для определения чувствительности к температуре датчик был помещен в температурную камеру Еспес MC-811P (ESPEC Corp., Япония). Эти эксперименты проводились независимо при постоянной температуре и постоянном давлении соответственно.

Для определения чувствительности датчика к давлению прикладывалась нагрузка дистиллированной водой до 100 бар с шагом 10 бар. График прогиба мембраны под действием внешнего давления представлен на рис. 3. Чувствительность датчика составила 50 нм/бар, нелинейность — 1.5 бар.

Для определения чувствительности к температуре датчик подвергался изменению температуры от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$ с шагом 20°C . Как было сказано ранее, интерферометр Фабри–Перо наряду с в.б.р. также реагирует на температуру. Чувствительность в.б.р. к температуре составила $10\text{ пм}/^{\circ}\text{C}$, а чувствительность интерферометра — $4.6\text{ нм}/^{\circ}\text{C}$. На графике на рис. 4 представлено сравнение в.б.р. и интерферометра. Стоит отметить, что изменение

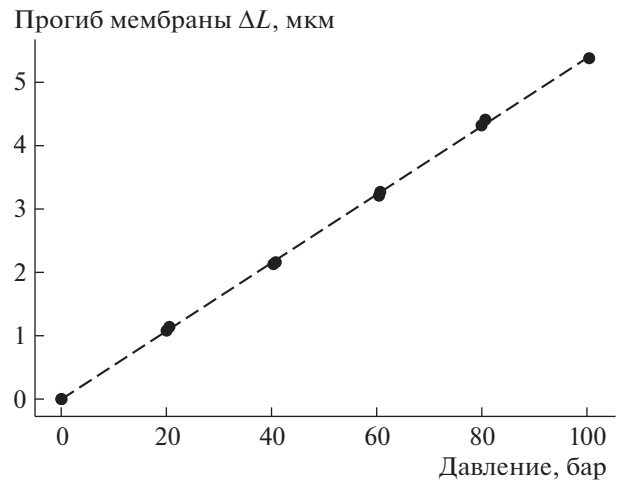


Рис. 3. Прогиб мембраны под действием внешнего давления.

длины воздушного зазора изменяется линейно, следовательно, температурный вклад в измерение давления можно компенсировать без дополнительных сложностей благодаря учету температуры с в.б.р.

Так же температура влияет и на чувствительность датчика по давлению (см. рис. 5).

Используя полученные коэффициенты чувствительности к давлению и к температуре, матричное уравнение датчика приобретает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10\text{ пм}/^{\circ}\text{C} \\ 50\text{ нм}/\text{бар} & 4.6\text{ нм}/^{\circ}\text{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}.$$

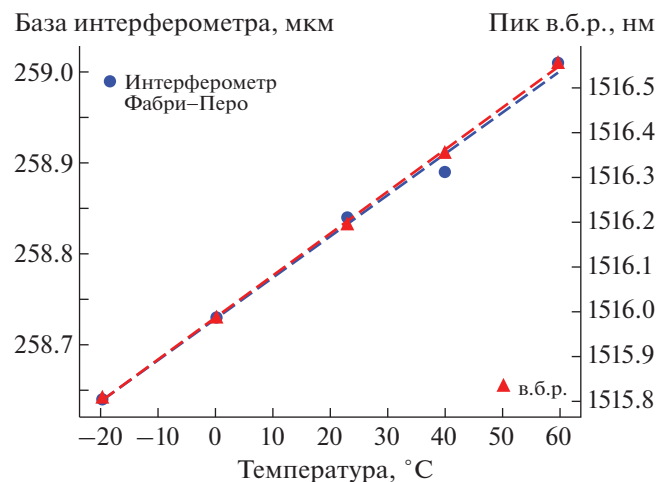


Рис. 4. Изменение базы интерферометра Фабри–Перо и смещение пика в.б.р. под действием температуры.

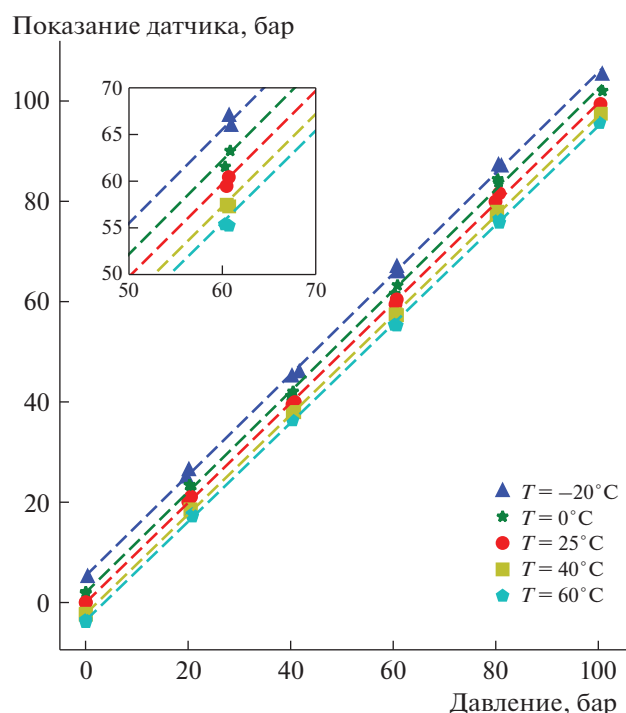


Рис. 5. Влияние температуры на показания датчика давления без использования термокомпенсации.

Обратная матрица используется для определения значения давления и температуры по оптическому спектру датчика давления и температуры.

Для проверки термокомпенсирующего элемента датчик был установлен в барокамере и термокамере, где на него воздействовали одновременно и давление, и температура. Данные о температуре датчика были сняты с сигнала в.б.р., а данные о давлении — с интерферометра Фабри—Перо. После испытаний формировались калибровочные уравнения датчика для каждой температуры. Показания датчика в виде прогиба мембраны на каждой температуре переводились в показания давления по этим калибровочным уравнениям. Результаты представлены на рис. 6.

Использование термокомпенсации заметно снижает разброс значений показаний датчика. Среднеквадратическое отклонение показаний без использования термокомпенсации составляет 3.5 бар, а с термокомпенсацией — 0.66 бар.

ВЫВОДЫ

В статье представлен волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления, работающий на основе интерферометра Фабри—Перо и волоконной брэгговской решетки. Показано, что использование данной технологии эффективно для одновременного изме-

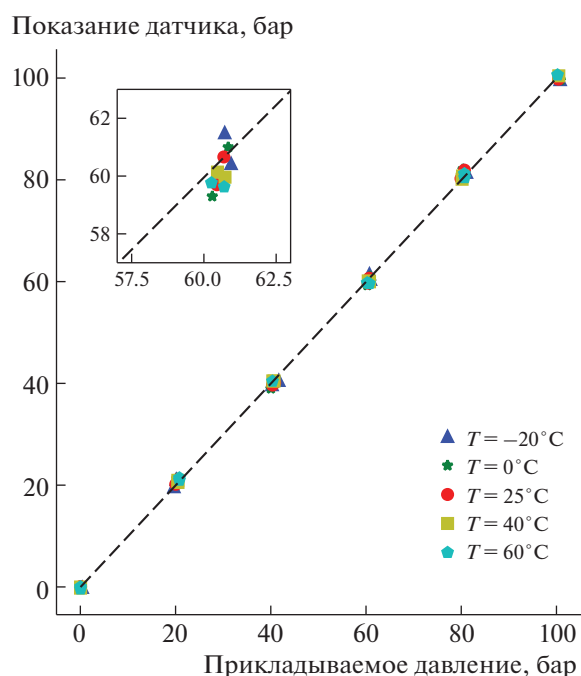


Рис. 6. Работа датчика при разной температуре с термокомпенсирующим алгоритмом.

рения этих физических величин. Чувствительность мембраны толщиной 50 ± 1 мкм к давлению составляет 50 нм/бар, а к температуре около 4.6 нм/ $^{\circ}\text{C}$, чувствительность положения пика в.б.р. к температуре — 10 пм/ $^{\circ}\text{C}$.

Использование одновременного измерения температуры и давления позволяет программно проводить компенсацию температурного вклада в показания датчика давления, тем самым снижая погрешность датчика при работе в различных температурных условиях. Благодаря преимуществам волоконной оптики такие датчики потенциально могут применяться для работы в условиях жесткой окружающей среды: газотурбинные двигатели и установки, нефте- и газодобыча, исследование различных геологических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 61.
2. Качура С.М., Постнов В.И. // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). С. 52. <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-optovolokonnye-datchiki-i-ih-primeneniye-obzor>
3. Jun Huang, Zude Zhou, Xiaoyan Wen, Dongsheng Zhang // Measurement. 2013. V. 46. № 3. P. 1041.
4. Zhang W.T., Li F., Liu Y.L., Liu L.H. // IEEE Photonics Technology Lett. 2007. V. 19. № 19. P. 1553.

5. Милёшин В.А., Симонов М.А., Брицкий В.А. // Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (11–12 апреля 2019, Москва). 2019. С. 115.
6. Волынец А.Б., Сосунов А.В., Гуляев А.П. // Физика для Пермского края. 2014. № 7. С. 11.
7. Достовалов А.В., Вольф А.А., Бабин С.А. // Прикладная фотоника. 2014. № 2. С. 48.
8. Hill G.C., Melamud R., Declercq F.E., Davenport A.A., Chan I.H., Hartwell P.G., Pruitt B.L. // Sensors and Actuators A: Physical. 2007. V. 138. №. 1. P. 52.
9. Zhu Y., Wang A. // IEEE Photonics Technology Letters. 2005. V. 17. № 2. P. 447.
10. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. С. 71.
11. Tonguy Liu, Gerard Franklyn Fernando, Yun-Jiang Rao, David A. Jackson, Lin Zhang, Ian Bennion // Smart Structures and Materials 1997: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics. 1997. V. 3042. P. 203.