

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК ИЗГИБА ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Бутов О.В.^{1*}, Базакуца А.П.¹, Чаморовский Ю.К.¹, Федоров А.Н.², Шевцов И.А.²

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва*

² *ООО «Пролог», г.Обнинск*

* *E-mail: obutov@mail.ru*

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16008

Внутриволоконные брэгговские решетки получили широкое распространение в качестве датчиков физических величин, в частности, датчиков деформации. Одним из ключевых преимуществ таких датчиков, помимо высокой точности измерений, является их возможность объединения в массивы путем записи брэгговских структур на одном волоконном световоде с индивидуальной брэгговской длиной волны для каждого датчика. Брэгговские датчики обладают высоким разрешением на уровне 1 микрострейн, а для целого ряда задач проблема измерения именно малых величин деформаций и изгибов является крайне актуальной. Такой тип сенсоров может применяться и для измерения изгибных деформаций. Однако для корректной работы сенсор должен быть установлен максимально удаленно от центральной оси изгиба. Для измерения изгибных деформаций, например внутри каналов и труб, необходимо создавать специальные составные конструкции на основе трансдюсеров, передающих деформацию изгиба в линейную деформацию сенсоров, закрепленных на боковой поверхности трансдюсера. Такие сенсорные системы позволяют, например, производить измерения методом погружения конструкции в измеряемый канал. Применение дифференциальных схем позволяет минимизировать чувствительность датчика к температуре и другим, не связанным с деформацией конструкции, воздействиям [1]. Отметим, что точность и надежность работы сенсорной системы зависит от методов крепления, выбранных материалов и условий эксплуатации. Применение составных конструкций трансдюсера может быть в ряде случаев затруднительно. Более того, с уменьшением поперечного размера датчика падает его чувствительность и возрастает вероятность ошибки из-за нестабильности используемых клеевых соединений, которые имеют ненулевую пластичность. Различие в температурных коэффициентах расширения различных элементов конструкции также является причиной возможного увеличения ошибок измерения. Применение датчиков в условиях повышенного фона ионизирующего излучения многократно усугубляет проблему стабильной работы датчиков. Большинство клеевых соединений не способны работать при высоком уровне радиационного фона, а радиационный нагрев, как правило металлического, основания конструкции приводит к существенному уменьшению динамического диапазона работы датчиков и уменьшению точности их показаний.

Ранее в ряде работ были предложены сенсоры изгиба, основанные на многосердцевинных волоконных световодах или световодных сборках, в которых записаны брэгговские решетки [2, 3]. Величина изгиба такого световода также определялась по принципу дифференциальной схемы. Однако, из-за малого диаметра волоконного световода чувствительность таких сенсоров к малым изгибам остается невысокой. В нашей работе мы предлагаем оригинальную, полностью волоконную конструкцию высокочувствительного датчика изгиба на основе брэгговских структур, лишённого вышеизложенных недостатков.

Конструкция нового типа датчика изгиба использует схожий принцип измерения и основана на специально разработанном стержне-световоде из кварцевого стекла с внешним диаметром 2.1 мм и содержащем 4 световедущие одномодовые сердцевинки, диаметром 7-8 μm . Сердцевинки расположены равномерно через 90° по периметру сечения несущего волокна. В каждой из сердцевин в одном сечении записываются брэгговские решетки на одну и ту же длину волны. Схематично конструкция такого световода с записанными брэгговскими решетками и фотография его торца с подсвеченными зеленым лазером сердцевинами, показаны на рис.1а и рис.1б соответственно.

Благодаря относительно большому, по сравнению со стандартным волоконным световодом, диаметру и, соответственно, далеко расположенными от центральной оси световода сердцевинами, такой датчик имеет многократно большую чувствительность. Суммарный сдвиг длин волн двух ортогональных датчиков при изгибе волоконного световода можно оценить, исходя из формулы [3]:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{d}{R} \quad (1)$$

где ε_1 и ε_2 – величина деформации верхней и нижней решеток соответственно, d – расстояние между сердцевинами, а R – радиус изгиба волокна.

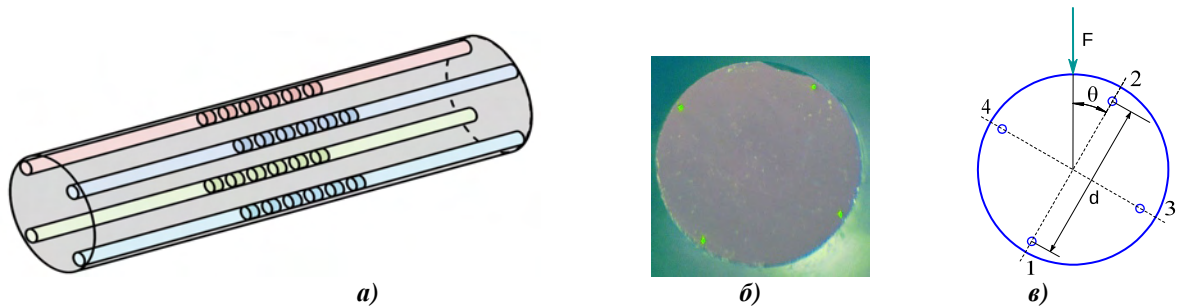


Рис.2 – Структурная схема участка волоконного световода с четырьмя сердцевинами и брэгговскими решетками (а), фотография торца волоконного световода (б), схематичное изображение нагрузки (в)

Значение чувствительности брэгговской решетки с резонансной длиной волны в районе 1.5 мкм составляет примерно 1.1 pm/με. Принимая во внимание, что стандартное разрешение системы на основе брэгговских сенсоров составляет 1 pm, для системы из двух сенсоров с учетом ошибки минимально детектируемая величина $\Delta\varepsilon$ будет составлять величину порядка 10^{-6} . Из формулы (1) нетрудно оценить, что при расстоянии между сердцевинами в 2 мм, в случае соосного воздействия на датчик, ожидаемый детектируемый радиус изгиба датчика составляет 2000 м.

Предложенная конструкция датчика позволяет проводить измерение с произвольным направлением деформации изгиба. В общем случае величина и направление деформации, а именно, кривизна k для четырехсердцевинного датчика может быть вычислена по общей формуле (2):

$$k = \frac{1}{R} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \cos \theta + (\varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot \sin \theta}{d} \quad (3)$$

где ε_1 , ε_2 , ε_3 и ε_4 – величины относительных деформаций решеток, расположенных в сердцевинах 1, 2, 3 и 4 соответственно (рис 1в).

Новая конструкция датчика не имеет клеевых и механических соединений в точках проведения измерений и представляет собой единую систему, собранную из материала с одинаковыми физическими свойствами. Таким образом, данная измерительная система является оптимальной для работы при сложных условиях эксплуатации, а именно при большом перепаде температур, а в случае применения сердцевины из радиационно-стойкого стекла может быть использована и в условиях высокого фона ионизирующего излучения. Так, например, данная сенсорная система может с успехом заменить ранее предложенную в работе [4] конструкцию для проведения измерений кривизны графитовой кладки канального реактора РБМК-1000. В ней использовался металлический стержень с четырьмя линиями световодов, в котором были записаны брэгговские датчики. Однако конструкция обеспечивала работоспособность при температурах не более 200 °С. Как и в работе [4], в новой конструкции были использованы сердцевины из кварцевого стекла, легированного азотом [5]. Данный тип световода обеспечивает приемлемый уровень стойкости к воздействию ионизирующего излучения [6, 7] и высокую термическую стойкость брэгговских решеток, записанных в нем [8, 9]. Новая сенсорная система позволяет проводить измерения уже непосредственно на работающем реакторе при температурах до 500 °С и обеспечивает приемлемый для проведения необходимых измерений уровень радиационно-наведенных потерь при длине активной зоны 8 м.

Литература

1. Xu M.G., et al, SPIE, 2292, 407-414 (1994)
2. Gander M.J., et al, Electron.Lett., 36, 120-121 (2000)
3. MacPherson W.N., et al, Meas. Sci. Technol., 17, 1180–1185 (2006)
4. Butov O.V., et al, SPIE, 9157, Article 91570X (2014)
5. Butov O.V., et al, OFS-26 conference, OSA Technical Digest, TuE103 (2018)
6. Dianov E.M., et al, Electron. Lett., 31 (17), 1490-1491 (1995)
7. Волошин В.В. и др., Радиотехника и электроника, 54, 890-894 (2009)
8. Butov O.V., Golant K.M., Nikolin I.V., Electron.Lett, 38, 523-525 (2002)
9. Butov O.V, Dianov E.M., Golant K.M., Meas. Sci. Technol., 17, 975–979 (2006)