УДК. 621.389 : 681.2

ГИБРИДНЫЕ ДАТЧИКИ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ

© 2016 Г.И. Леонович¹, С.В. Олешкевич²

¹Секция прикладных проблем при Президиуме Российской академии наук, г.Самара ² НПП «Современные технологии», г. Самара

Статья поступила в редакцию 20.11.2016

В статье приведен обзор научных достижений и предложены новые варианты схем и алгоритмов функционирования аналоговых и цифровых гибридных датчиков на базе волоконных брэгговских решеток (BБР), которые существенно расширяют перечень измеряемых величин и процессов, а также позволяют регулировать чувствительность, точность и динамический диапазон датчиков. Отличительным признаком таких датчиков является сенсорно-актюаторная структура (CAC) – дополнительный преобразователь измеряемой величины в деформирующее воздействие на ВБР. Разработана математическая модель магниточувствительной САС в качестве считывающего элемента, получены практические рекомендации по изготовлению цифровых датчиков линейных и угловых перемещений.. *Ключевые слова:* волоконные брэгговские решетки, гибридные датчики, сенсорно-актюаторные структуры, цифровые датчики перемещения.

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические сенсорные структуры - FOSS (Fiber Optic Smart or Sensory Structures) одно из наиболее перспективных направлений в измерительной технике. К FOSS относят сенсорные сети из датчиков на волоконных брэгговских решетках (ВБР), которые получают широкое распространение в энергетике, строительстве, изделиях аэрокосмической промышленности и др. FOSS-система обслуживается единым устройством обработки сигналов и управления, в состав которого входят источники и приемники оптического излучения, оптические и электронные устройства обработки информации и др. Структура содержит до нескольких сотен датчиков на оптический канал, использует в качестве информационного параметра длину волны света и выполняет до 5000 и более отсчетов в секунду, что на два-три порядка превышает производительность оптоволоконных ИИС, построенных на аттенюаторном принципе. Другие конкурентные преимущества FOSS заключаются в низкой чувствительности к деградации параметров источников и приемников излучения, соединительных элементов и оптического волокна [1].

По мере роста потребности в расширении перечня контролируемых параметров возникают проблемы, связанные с ограниченным базисом созданных или анонсируемых датчиков на ВБР, с разработкой новых типов оптических волокон с избирательной чувствительностью к измеряемым величинам, а также эффективных сенсорноактюаторных структур, взаимодействующих с материалом стандартного оптического волокна (OB) [2, 3]. Особо актуальны вопросы создания гибридных датчиков электрических и химических величин, а также цифровых датчиков для измерения широкодиапазонных угловых и линейных перемещений.

В статье представлены направления развития, научные достижения и результаты исследований авторов в области создания гибридных датчиков на ВБР.

СТРУКТУРА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГИБРИДНЫХ ДАТЧИКОВ НА ВБР

В основу большинства гибридных датчиков на ВБР положена регулярная короткопериодическая решетка, чувствительная к температуре T и непосредственным деформирующим воздействиям ε (рис. 1).



(с зачищенным сенсорным участком OB)

Такая ВБР представляет собой участок ОВ длиной $L_{\rm BG}^{}=1,0-10,0$ мм, в котором эффективный показатель преломления основной моды $n_{\rm eff}$ промодулирован в продольном направлении

Леонович Георгий Иванович, доктор технических наук, профессор, начальник отделения Секции прикладных проблем при Президиуме РАН. E-mail: leogi1@mail.ru Олешкевич Сергей Владимирович, заместитель генерального директора по инновациям и инвестициям АО «Самарский электромеханический завод». E-mail: 79033036000@yandex.ru

с пространственным периодом L_0 =300–600 нм и глубиной модуляции $\delta n \approx 10^{-4}$.

Связь между относительным изменением длины брэгговской волны ($\lambda_{BG} = 2n_{eff}\Lambda$), изменением температуры ΔT , осевой деформацией $\epsilon = \Delta L_{BG}/L_{BG}$ и изменением показателя преломления определяется как [4]

$$\frac{\Delta\lambda_{BG}}{\lambda_{BG}} = \delta\lambda_{BG} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_{\Lambda} + \alpha_n)\Delta T, \quad (1)$$

где p_e – редуцированный деформационно-оптический коэффициент первого порядка; α_{Λ} – коэффициент температурного расширения OB; α_n – температурно-оптический коэффициент преломления.

В электронном блоке (интеррогаторе) осуществляется фотоэлектрическое преобразование и цифровая обработка отраженных от решеток оптических сигналов (рис. 2). Современные интеррогаторы при приеме сигналов от группы до нескольких десятков датчиков на канал обеспечивают определение смещения спектра от каждой ВБР с точностью до долей пм, что составляет (0,1-0,5)% от диапазона изменения ΔL_{BG} . Типичные значения сдвига центральной длины волны: по температуре $\Delta \lambda_{BG}(T) \sim 0,01$ нм/К, по деформации $\Delta \lambda_{BG}(\varepsilon) \sim 10^3 \times \varepsilon$ нм. Структура и принцип действия датчиков на ВБР позволяют формировать из них высоконадежные резервированные сети со сложной топологией [1-3].



Рис. 2. Фрагмент сенсорной сети на ВБР

Построенные на основе ВБР гибридные датчики содержат дополнительную сенсорно-акюаторную структуру (САС), тем или иным образом сопряженную с сенсорным участком ОВ длиной $L_f \ge L_{BG}$. САС выполняется в форме пластины, тела сложной конфигурации или пленочного покрытия из материала со стрикционным или иным динамическим эффектом. Функции САС может исполнять также резервуар (кювета) с жидкой или газообразной средой и др. [3, 5-7].

На рис. 3 показаны некоторые варианты сопряжения ОВ и САС: а) покрытие на зачищенном сенсорном участке ОВ; б) кольцевой магнит, закрепленный на ОВ с восстановленным покрытием на сенсорным участке; в) кольцевой электрет, закрепленный на ОВ с тонкопленочным защитным покрытием на сенсорным участке; г) стрикционная пластина с частично восстановленным покрытием. Длина L_f сенсорного участка ОВ определяется выбранным способом измерения и конструкцией САС.



Рис. 3. Варианты сопряжения САС и ВБР

Способы и материалы для формирования и крепления САС к ОВ и, при необходимости, САС к измеряемому объекту, также могут быть разными. Наибольшее распространение получили датчики с нанесенными пленочными покрытиями и применение твердотельных и пластичных САС как отдельных элементов, фиксируемых на ОВ посредством двухкомпонентных эпоксидных клеевых соединений. При выборе клея необходимо учитывать модуль упругости и толщину затвердевшей массы, которые определяют влияние клеевого слоя на чувствительность, статическую и динамическую погрешности гибридного датчика [2-7].

На рис. 4 в качестве примера приведен вариант реализации САС в виде тонкопленочного покрытия. На отрезок одномодового ОВ длиной $L_f=20,0$ мм и радиусом сердцевины $r_c=4,50$ мкм с выполненной в нем ВБР длиной $L_{BG}=10,0$ мм нанесена пленка толщиной $b_{sas}=0,25$ мкм из ферромагнитного материала – феррита кобальта. Технологический процесс содержит ряд стадий, в том числе, снятие буферного покрытия с ВБР с применением хлороформа; очистка и продувка инертным газом (гелий или азот); нанесение рабочего пленкообразующего раствора, отверждение раствора при температуре 50-60 °C в присутствии магнитного поля для ориентировки доменов в кристалле. По аналогичному или близкому принципу строится ряд других разрабо-

танных датчиков с пленочным покрытием, предназначенных для индикации наличия и определения концентрации жидких и газообразных веществ. Особое значение придается получению материала с требуемыми физико-химическими свойствами и способу сопряжения САС и ОВ. Основные характеристики САС: чувствительность; динамический диапазон; силовые параметры (деформация ОВ); гистерезис; воспроизводимость; адгезия; функция деградации; техникоэкономические показатели. Анализ публикаций показывает, что наибольших успехов добились разработчики гибридных ВБР-датчиков влажности, давления и магнитного поля [3-7].



Рис. 4. Сенсорная структура на основе ВБР с пленкой из феррита кобальта

В гибридных датчиках давления САС выполняют, как правило, функции редукции, концентрации или распределения. Причем, если гибридные датчики влажности, концентрации веществ и давления предназначены для использования по прямому назначеныю, то на базе датчиков магнитного поля можно строить устройства и системы для измерения перемещений, коррозии, реологических параметров магниточувствительных материалов и др.

Высокой надежностью, простотой конструкции и калибровки, обусловленной отсутствием пленочных покрытий на участке ОВ с ВБР, отличаются датчики магнитного поля с САС из твердотельных постоянных магнитов. На рис. 5 показана упрощенная схема чувствительного элемента (ЧЭ) из ОВ с ВБР и двух постоянных магнитов (ПМ) [8].

Будем считать, что магниты - однотипные, с одинаковыми значениями толщины h, внешнего R и внутреннего r радиусов. Один из концов сенсорного участка ОВ L_f крепится к корпусу датчика посредством клея с толщиной слоя b_a , а для второго предусмотрен допустимый осевой люфт $0 \le \Delta L_{don} \le 0,01L_f$. Осевое смещение $X \, \Pi M2$ относительно ПМ1, жестко закрепленного на ОВ, вызывает пропорциональное смещение МП1 с изменением длины сенсорного участка на величину $\Delta L_f(X) / L_f = \varepsilon(X)$ и, соответственно, с изменением длины волны λ_{BG} отраженного от решетки сигнала согласно (1).



Рис. 5. Магниточувствительный элемент с подвижным (МП2) и фиксированным (МП1) постоянными магнитами и восстановленным буферным покрытием

Пусть магниты направлены одноименными полюсами друг к другу, следовательно, их взаимодействие будет носить характер отталкивания.

Так как *R>>r*, в упрощенной модели ЧЭ исследуем силу взаимодействия двух цилиндрических магнитов, которая равна [9]:

$$F_{mm}(X) = \frac{J^2 \pi R^4 h \mu_0}{2} \times \left(\frac{1}{\left(R^2 + (x_0 - X)^2\right)^{3/2}} - \frac{1}{\left(R^2 + (x_0 - X + h)^2\right)^{3/2}} \right), \quad (2)$$

где J – намагниченность магнита; μ_0 – магнитная постоянная, x_0 - максимальное значение расстояния между ПМ1 и ПМ2.

Будем считать, что ПМ1 жестко закреплен на сердцевине ОВ, тогда в сенсорном участке возникает противодействующая сила упругости

$$F_G = E_f S_f \frac{\Delta L_f}{L_f} = E_f \frac{\pi d_f^2}{4} \varepsilon, \qquad (3)$$

где E_f – модуль Юнга ОВ, S_f – площадь поперечного сечения сердцевины ОВ; L_f и ΔL_f - длина и удлинение сенсорного участка ОВ.

Приравняв $F_{mm}(X)$ к F_{G} , получим зависимость осевой деформации участка ОВ и, соответственно, относительного смещения длины волны ВБР (см. форм. 1) от взаимного перемещения X магнитов с фиксированными значениями намагниченности *J*:

$$\varepsilon(X) = \frac{4F_{mm}(X)}{E_f \pi d_f^2}.$$
(4)

Восстановление буферного или нанесение специального регулирующего покрытия на сенсорный участок ОВ изменяет силу его упругости:

$$F_{Gb} = \left(k_{bf}E_f \frac{\pi d_f^2}{4} + k_{fb}E_b \frac{\pi \left(d_b - d_f\right)^2}{4}\right)\varepsilon, \quad (5)$$

где k_{bf} – коэффициент передачи деформации от покрытия к ОВ, k_{fb} – коэффициент передачи деформации от ОВ к покрытию; E_b – модуль Юнга покрытия; d_b – внешний диаметр БП.

Значения коэффициентов k_{bf} и k_{fb} находятся в диапазоне от 0 до 1, зависят от скорости изменения силы, температурного воздействия на материалы, способа закрепления МП1 на OB, длины сенсорного участка OB, применяемых материалов, толщины покрытий и других факторов. Применение магнитов с отличающимися параметрами и многослойных защитно-регулирующих покрытий на сенсорный участок OB, учет дополнительных конструкционных и эксплуатационных факторов и способов коррекции погрешностей усложняют модель, и в каждом отдельном случае требуется проведение экспериментальных исследований [8, 9].

ЦИФРОВЫЕ ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА МАГНИТНЫХ ЧЭ

Разработанный ЧЭ может использоваться в качестве магниточувствительного считывающего элемента (МСчЭ) в цифровых датчиках углового и линейного перемещения на базе кодирующих многополюсных магнитных линеек (МПМЛ).

На рис. 6 представлена схема, иллюстрирующая принцип работы датчика линейного перемещения.



Рис. 6. Принцип работы цифрового датчика линейного перемещения на основе многополюсной магнитной линейки

Оценивается перемещение *X* МПМЛ, содержащей набор из *N* цилиндрических постоянных магнитов, относительно МСчЭ с цилиндрическим магнитом, закрепленным на конце участка оптоволокна с ВБР (см. рис. 36).

Суммарную силу F_{Σ} взаимодействия между МСчЭ и N МПМЛ можно представить с использованием упрощенной модели взаимодействия магнитных диполей [10]:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 15mm_0 z^2 \sum_{i=1}^{N} \frac{(x - (i - 1)a_0)}{(z^2 + (x - (i - 1)a_0)^2)^{7/2}} - \frac{3mm_0 \sum_{i=1}^{N} \frac{(x - (i - 1)a_0)}{(z^2 + (x - (i - 1)a_0)^2)^{5/2}} ; (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -9mm_0 z \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\left(z^2 + (x - (i - 1)a_0)^2\right)^{5/2}} + 15mm_0 z^3 \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\left(z^2 + (x - (i - 1)a_0)^2\right)^{7/2}} \quad ; (7)$$

$$F_{\Sigma} = |\overrightarrow{F_{\Sigma}}| = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad . \tag{8}$$

В формулах (6-8): m – магнитный момент магнита на многополюсной кодирующей магнитной линейке; m_0 – магнитный момент магнита на оптоволокне с ВБР; z – расстояние от МПМЛ до магнита на оптоволокне; a_0 – период следования магнитных диполей на МПМЛ; v – потенциальная энергия взаимодействия ПМ_{Сч} и магнитной линейки.

На фиг. 7 приведена эпюра зависимости $F_{\Sigma}(X)$.



Рис. 7. Зависимость $F_{y}(X)$

При реализации модели заданы следующие параметры: *N*=250; *m*₀=*m*=0,1 А·м²; радиусы магнита на многополюсной кодирующей магнитной линейке и магнита на оптоволокне $R_0 = R_{mv} = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м; длина магнитов на линейке и МСчЭ $h=3\cdot10^{-3}$ м; радиус оптоволокна с защитными покрытиями $r_f = 0, 1 \cdot 10^{-3}$ м; длина участка оптоволокна с ВБР L_f =0,01 м; модуль Юнга для кварцевого стекла $E_f = 73 \cdot 10^9$ МПа; $a_0 = 0, 5 \cdot 10^{-3}$ м; $z_0 = 0, 5 \cdot 10^{-3}$ м. При уменьшении технологического зазора до $z = 3 \cdot 10^{-4}$ м для получения $\varepsilon = 10^{-4}$ требуемое максимальное значение силы взаимодействия составляет $F_{\Sigma \max} = 0,988$ Н. Уменьшение зазора до 50 мкм дает возможность существенно, до одного порядка, снизить намагниченность и габариты элементов МПМЛ и ПМ_{сч}.

На рис. 8а изображен построенный на основе рассмотренной модели цифровой инкрементный

датчик перемещения. Датчик содержит МПМЛ и считывающий модуль (СчМ) из двух считывающих элементов (СчЭ), построенных по схеме, изображенной на рис. 3б. СчЭ1 состоит из МП1 и ВБР1, СчЭ2 – из МП2 и ВБР2. СчЭ расположены вдоль оси перемещения магнитной линейки таким образом, чтобы расстояние между их центрами было равно $a=ja_0+a_0/4$, где a_0 - период МПМЛ, *j*=1, 2, 3..... Фрагменты участка ОВ, размещенного в U-образном пазу СчМ, жестко закреплены таким образом, чтобы обеспечивать свободную деформацию обоих сенсорных участков ОВ в пределах, достаточных для индикации в интеррогаторе изменения длины волны ВБР в заданном диапазоне с заданной точностью и не приводящих к деградации и обрывам оптического волокна [11]. Для увеличения разрешающей способности можно применять известные методы интерполяции и обработки сигналов [12]. Перемещение магнитной линейки относительно двух линий считывания отображается в виде двух модулированных по длине волны оптических сигналов с одинаковым периодом a_0 и пространственно смещенных друг относительно друга на величину *a*₀/4 (рис. 8,б). Смещение позволяет в процессе последующего оптоэлектронного преобразования и цифровой обработки сигналов в интеррогаторе определить направление перемещения. Причем, уменьшение а сопровождается пропорциональным уменьшением погрешности считывающей системы, являющейся доминирующей составляющей в суммарной погрешности датчика. Поскольку температурный дрейф и погрешность гистерезиса обеих ВБР, выполненных на общем ОВ на минимальном удалении друг от друга, практически одинаковые, то для повышения точности считывающей системы достаточно введения в датчик одной дополнительной ВБР с применением известных методов и алгоритмов автокоррекции инструментальных погрешностей [9, 12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные материалы показывают перспективность глубоких научных исследований по синтезу новых материалов и разработке конструктивных схем стабильных и надежных САС для гибридных датчиков на BБР с регулируемыми параметрами чувствительности, точности и динамического диапазона. Пример применения разработанных авторами магниточувствительных САС в качестве считывающих элементов цифровых датчиков угловых и линейных перемещения раскрывает возможности построения высокопроизводительных FOSS с дискретными оптическими сигналами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Fiber Optic Sensing System (FOSS) monitors multiple critical parameters in real time. URL: https://www. nasa.gov/offices/ipp/centers/dfrc/index.html (дата обращения 15.11.2016).
- Kuo Li. Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Grating Sensors /Hindawi Publishing Corporation Journal of Sensors Volume 2016, Article ID 1284520, 8 pages. URL: http:// dx.doi.org/10.1155/2016/1284520 (дата обращения 13.11.2016).





- Yang M.Optical Fiber Sensors with Coatings as Sensitive Elements, Asia Communications and Photonics Conference, 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper AF1I.1.URL: https://www.osapublishing.org/abstract. cfm?URI=ACPC-2014-AF1I.1 (дата обращения 13.11.2016).
- 4. *Удд Э*. Волоконно-оптические датчики. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
- Shiuh-Chuan Her and Chih-Ying Huang. Effect of Coating on the Strain Transfer of Optical Fiber Sensors./ Sensors (Basel). 2011; 11(7): 6926–6941. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/ PMC3231681/ (дата обращения 15.11.2016).
- 6. A Magnetostrictive Composite-Fiber Bragg Grating Sensor / Sully M. M. Quintero, Arthur M. B. Braga, Hans I. Weber, Antonio C. Bruno and Jefferson F. D. F. Araújo // Sensors 2010, 10, 8119-8128. URL: https://www.mdpi. com/1424-8220/10/9/8119/pdf (дата обращения 14.11.2016).
- 7. Lutang Wang, Nian Fang and Zhaoming Huang. Polyimide-Coated Fiber Bragg Grating Sensors for Humidity Measurements. /High Performance Polymers - Polyimides Based - From Chemistry to

Applications, Chapter 8. URL: http://cdn.intechopen. com/pdfs/41504/InTech-Polyimide_coated_fiber_ bragg_grating_sensors_for_humidity_measurements. pdf (дата обращения 15.11.2016).

- 8. *Leonovich G. I., Paranin V.D., Karpeev S.V.* Correction of parameters of fiber-optical systems on the basis of the magneto tunable gradient elements / CEUR Workshop Proceedings, Samara, 2015. No.V. 1490. P. 133-137.
- 9. Dongsheng Li, Liang Ren and Hongnan Li, Mechanical Property and Strain Transferring Mechanism in Optical Fiber Sensors/"Fiber Optic Sensors", Chapter 18. URL: http://cdn.intechopen.com (дата обращения 17.11.2016).
- 10. *Браун У. Ф*. Микромагнетизм [пер. с англ.]. М., 1979. 159 с.
- Волоконно-оптический датчик линейного перемещения с закрытым оптическим каналом / Г.И. Леонович, Н.В. Рясной, С.В. Ивков, Н.А. Ливочкина // Актуальные проблемы ракетно-космической техники: Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. (IV Козловские чтения). Самара, 2015. С. 323 - 326.
- Леонович Г. И. Оптоэлектронные цифровые преобразователи перемещений для жестких условий эксплуатации. Самара: Изд-во СГАУ, 1998. 266 с.

HYBRID SENSORS ON FIBER-OPTIC BRAGG GRATINGS

© 2016 G.I. Leonovich¹, S.V. Oleshkevich²

¹ Section of Applied Problems RAS, Samara ² Modern Technologies Ltd, Samara

The article provides an overview of the scientific achievements and offers the new options of the schemes and operating algorithms of analogue and digital hybrid sensors based on fiber Bragg gratings (FBGs), which significantly expand the list of measured values and processes, as well allowing adjustment of the sensitivity, accuracy and dynamic range of the sensor. The key feature of these sensors is the sensor actuator structure (SAS) - additional converter of the measured value to the distorting impact to the FBG. Developed the mathematical model of magnetically sensitive SAS as a reading element, obtained practical recommendations for the manufacturing of digital sensors of linear and angular displacements. *Keywords*: fiber Bragg gratings, hybrid sensors, sensor actuator structure, digital displacement sensors.

Georgy Leonovich, Doctor of Technics, Professor, Head of Department of the Section of Applied Problems of the Presidium of the Russian Academy of Sciences. E-mail: leogi1@mail.ru

Sergey Oleshkevich, Deputy Director General for Innovation and Investment JSC "Samara Electromechanical Plant". E-mail: 79033036000@yandex.ru