

# РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.389:681.2

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ВНУТРИВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

И.Л. Борисенков<sup>1</sup>, Г.И. Леонович<sup>1</sup>, А.И. Данилин<sup>2</sup>, А.Ф. Федечев<sup>2</sup>, Н.П.  
Козлов<sup>2</sup>, С.В. Куприянов<sup>1</sup>, С.В. Олешкевич<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Самара  
Самарский университет, г. Самара

<sup>3</sup> АО «Самарский электромеханический завод», г. Самара

Волоконно-оптические сенсорные структуры - FOSS (Fiber Optic Sensory Structures) – одно из наиболее перспективных направлений в измерительной технике. К ним относят сенсорные сети из датчиков на волоконных брэгговских решетках (ВБР), которые получают широкое распространение в системах телекоммуникации, изделиях аэрокосмической промышленности, энергетике, строительстве и др. Структура содержит до нескольких сотен датчиков на оптический канал и выполняет измерения с разрешением до единиц метров на расстоянии до 100 км с частотой 5000 и более отсчетов в секунду, что на два-три порядка превышает производительность оптоволоконных ИИС, построенных на аттенуаторном принципе. Наиболее известные производители FOSS: Fiber SenSys Inc.(США), Remsdaq (Англия), Future Fibre Technologies (Австралия), TSS (Израиль) и др. Недостатком всех известных FOSS является ограниченное число измеряемых величин - деформация, температура, вес, давление, малые перемещения и вибрация, которые не в полной мере обеспечивают требуемый объем информации. Кроме того, они не позволяют оценивать изменение физических и химических свойств конструкционных материалов при аварийных ситуациях, связанных с пожаром, утечкой химических веществ, нарушения системы радиационной защиты на АЭС и т.п. [1-3]

В связи с необходимостью существенного увеличения контролируемых параметров и возрастанием роли защищенных физических каналов для сбора и передачи измерительной информации зарубежные специалисты основные успехи в области построения и практического внедрения FOSS связывают с сочетанием беспроводных и

волоконно-оптических технологий. Например, для акустических измерений разработан распределенный пассивный акустический сенсор (Distributed Acoustic Sensing, DAS), который содержит стандартное оптоволокно G.652 и позволяет обнаруживать вибрацию грунта на расстоянии до нескольких десятков километров вдоль оптического кабеля. Информация с датчиков собирается посредством волоконно-оптической сети и передается на удаленный АРМ по защищенному радиоканалам. Система пассивного акустического обнаружения типа Stevens Passive Acoustic Detection System/Spades (Голландия) содержит набор гидрофонов, которые могут соединяться посредством оптоволокнуа и способны обнаружить малые НПА и отдельных водолазов на дистанциях до 120 метров. Информация через радиобуи передается на борт судна, КА или ЛА [1-3].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, в том числе проводимых в СНИУ, дают основание предполагать о новых возможностях FOSS на гибридных ВБР датчиках, определяемых расширением перечня измеряемых физических и химических величин. В основу большинства таких датчиков положена регулярная короткопериодическая решетка, чувствительная к температуре  $T$  и контактным деформирующим воздействиям  $\varepsilon$  (рис. 1).

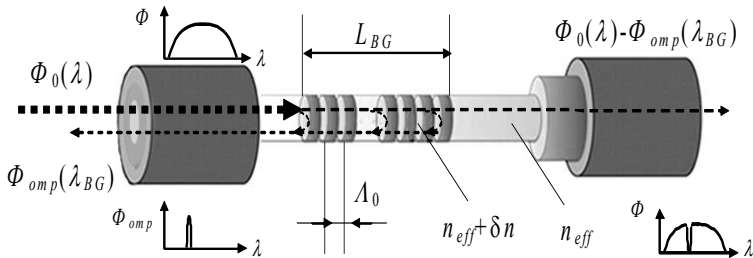


Рисунок 1 - Структура ВБР (с защищенным сенсорным участком ОВ)

ВБР представляет собой участок ОВ длиной  $L_{BG}=1,0-10,0$  мм, в котором эффективный показатель преломления основной моды  $n_{eff}$  промодулирован в продольном направлении с пространственным периодом  $\Lambda_0=300-600$  нм и глубиной модуляции  $\delta n \approx 10^{-4}$ . Связь между относительным изменением длины брэгговской волны ( $\lambda_{BG} = 2n_{eff}\Lambda$ ), изменением температуры  $\Delta T$ , осевой деформацией  $\varepsilon = \Delta L_{BG}/L_{BG}$  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;  $\alpha_A$  – коэффициент температурного расширения ОВ;  $\alpha_n$  – температурно-оптический коэффициент преломления.

Построенные на основе ВБР гибридные датчики содержат дополнительную сенсорно-актюаторную структуру (САС), тем или иным образом сопряженную с сенсорным участком ОВ  $L_f$ . САС может быть выполнена 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. [5]. На рис. 2 показаны некоторые варианты сопряжения ОВ и САС: а) - покрытие на зачищенном сенсорном участке ОВ; б) - кольцевой электрет, закрепленный на ОВ с тонкопленочным защитным покрытием на сенсорном участке; в) – два кольцевых магнита, один в свободном перемещении, другой закреплен на ОВ с восстановленным покрытием на сенсорном участке; г) – стрикционная пластина с частично восстановленным покрытием. Длина  $L_f$  сенсорного участка ОВ определяется выбранным способом измерения и конструкцией САС.

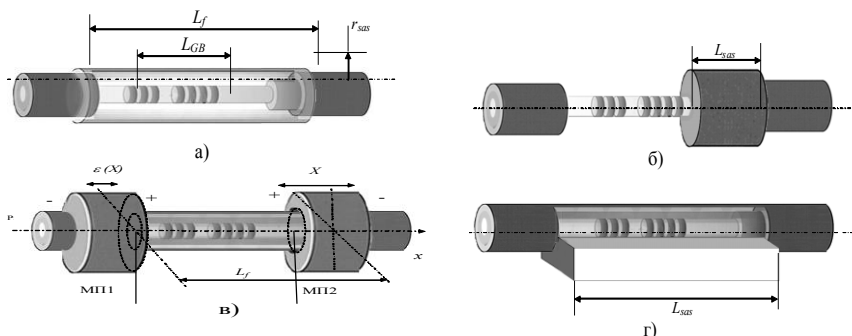


Рисунок 2 - Варианты сопряжения САС и ВБР

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 пленочными покрытиями, с твердотельными и пластичными САС, как отдельными элементами, фиксируемыми на ОВ посредством 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.

Некоторые из материалов для САС представлены в таблице 1. При этом показано, что измерение какой-либо величины может применяться

для измерения различных видов перемещений, коррозии, параметров электрических цепей и др. при проектировании FOSS и автономных сенсорных модулей. Ведущие фирмы, активно работающие в данном направлении: Micron Optics (США), FBGS International (Бельгия), AFW Technologies (Австралия), FiberSensing (Португалия), Shenzhen Fiberlake Technology (Китай), АО «Инверсия-Сенсор», НЦВО «Фотоника», «Нева Технолоджи» и др.

Таблица 1 - Материалы для САС ГВБР

№п/	Материалы	Измеряемая величина	
		Базовая	Дополнительные
1	Магнитострикционные материалы, постоянные магниты	Напряженность постоянного и переменного магнитного поля	Глубина коррозии металла, вибрация, скорость и величина углового и линейного перемещения, расход жидкостей и газов, параметры трансформаторов и катушек индуктивности
2	Электрострикционные материалы, электреты	Постоянное и переменное электрическое поле	Вибрация, скорость и величина углового и линейного перемещения, расход жидкостей и газов, параметры конденсаторов
3	Акусточувствительные материалы	Акустическое поле	Вибрация, скорость и величина пространственного перемещения
4	Пористые материалы с избирательной чувствительностью к химическим веществам	Наличие и концентрация химического вещества	Расход и динамика изменения концентрации жидкостей и газов в замкнутом и открытом пространстве.
5	Полимеры, чувствительные к воздействию химических веществ	Наличие и концентрация химического вещества	Расход и динамика изменения концентрации жидкостей и газов в замкнутом и открытом пространстве.

В последние годы появились публикации научных статей, в которых на основе математических моделей деформации оптоволокна разной сложности обсуждаются возможности создания новых типов датчиков на ВБР, а также влияние различных факторов на их работу [6-8]. Главным недостатком всех перечисленных работ является отсутствие последовательной математической модели деформации сенсорного участка

оптоволокна. Авторами предложен новый подход к моделированию ОВ с привязкой к способу сопряжения с САС. В качестве примера ниже приведен вариант, соответствующий рис. 2г.

Решается краевая задача о равновесии бесконечного цилиндра радиуса  $R$ , нагруженного по участку боковой поверхности. Пусть нормальное сечение цилиндра занимает область  $-\infty < z < \infty, -0 \leq r \leq R$  (рис. 3).

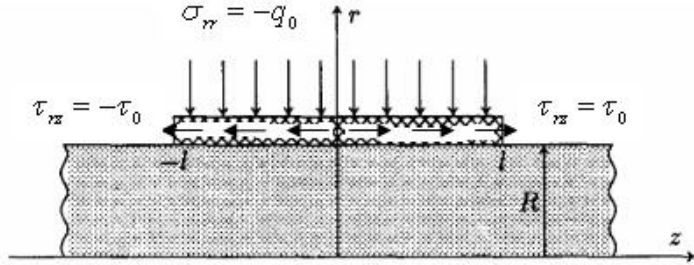


Рисунок 3 – Контактное одностороннее воздействие САС на ОВ

Деформированное состояние характеризуется следующими соотношениями:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon_{z\varphi} = 0, \quad \varepsilon_{r\varphi} = 0, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right), \quad (2)$$

а напряженное состояние описывается зависимостями:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} = 2\mu\varepsilon_{rr} + \lambda e, \quad \sigma_{\varphi\varphi} = 2\mu\varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda e, \quad \sigma_{zz} = 2\mu\varepsilon_{zz} + \lambda e, \quad \tau_{rz} = 2\mu\varepsilon_{rz}, \\ \tau_{r\varphi} = 0, \quad \tau_{z\varphi} = 0, \quad e = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $u, w$  - компоненты вектора перемещения точек цилиндра при его нагружении по осям  $r$  и  $z$ , соответственно;  $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\varphi\varphi}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{z\varphi}, \varepsilon_{r\varphi}, \varepsilon_{rz}$  - элементы тензора деформаций;  $\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{zz}, \tau_{z\varphi}, \tau_{r\varphi}, \tau_{rz}$  - элементы тензора напряжений;  $\lambda, \mu$  - коэффициенты Ламе.

После определения условий равновесия и разделения вектора воздействия на касательную и радиальную составляющие выражения для  $u, w$  и  $e$  определяются в форме интегралов Фурье.

Численная оценка полученных результатов показала, что при деформации оптоволокна в условиях рассмотренной механической задачи поверхности неоднородностей показателя преломления, определяющие параметры ВБР, смещаются на разные расстояния в зависимости от положения и существенно изменяют свою форму. Оба эти фактора приводят к тому, что спектральная полоса отраженного такой решеткой света уширяется, а максимум ее смещается по отношению к максимуму отражения идеализируемой (т.е. эквидистантно-деформируемой) решетки.

Это позволяет в 1,3-1,7 раза точнее оценить сопоставимость результатов численного и натурального экспериментов.

Аналогичный подход применен при построении моделей для вариантов, показанных на рис. 2а-в. Полученные точные решения охватывают достаточно широкий круг практически важных задач, а также могут быть использованы в качестве нулевого приближения в теории возмущений. Разработанные модели дают возможность с высокой степенью точности оценить ключевые параметры при поиске новых материалов с заданными упругими характеристиками для чувствительных элементов при проектировании перспективных гибридных датчиков на ББР.

#### Список использованных источников

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 5.04.2018).
2. *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 5.04.2018).
3. *M. Yang*. Optical Fiber Sensors with Coatings as Sensitive Elements, Asia Communications and Photonics Conference, 2014, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper AF11.1. URL: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2014-AF11.1> (дата обращения 5.04.2018).
4. *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.
5. *Ленонович Г.И., Олешкевич С.В.* Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках / Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 18, № 4(7), 2016, с. 1340-1345
6. *Mizutani Y., Groves R.M.* Multi-functional measurement using a single FBG sensor // Experimental Mechanics. 2011. Vol. 51. P. 1489.
7. *Schukar V., Kusche N., Kalinka G. et al.* Field deployable fiber Bragg grating strain patch for long-term stable health monitoring applications // Applied Sciences. 2013. Vol.3. P.39.
8. *Zhao H., Wang Q., Qiu Y. et al.* Strain transfer of surface-bonded fiber Bragg grating sensors for airship envelope structural health monitoring // Applied Physics Engineering. 2012.