

УДК 681.586.5

С.М. Качура¹, В.И. Постнов¹

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОПТОВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61

Значительное увеличение применения композиционных материалов, в том числе в авиационно-космической технике, а также в других областях, требующих повышенной надежности конструкций, таких как нефтедобывающая, строительная и др., делает задачу мониторинга состояния конструкций (технология SHM – structural health monitoring) весьма актуальной. Одним из наиболее перспективных подходов является использование оптоволоконных датчиков в качестве составной части системы мониторинга. Оптоволоконные датчики по сравнению с классическими имеют ряд существенных преимуществ.

В данной обзорной статье показано разнообразие применений оптоволоконных систем встроенного контроля как в области авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов, так и в гражданской сфере. Рассмотрены перспективные оптоволоконные системы. Показаны области применения подобных систем и направления их развития.

Ключевые слова: система встроенного контроля, оптоволоконная система мониторинга, мониторинг конструкций, волоконная брэгговская решетка, полимерный композиционный материал (ПКМ), интеррогатор.

S.M. Kachura¹, V.I. Postnov¹

PERSPECTIVE OPTICAL FIBER SENSORS AND THEIR APPLICATION (review)

A significant increase in the use of composite materials, including in aerospace engineering, as well as in other areas requiring increased reliability of structures, such as oil production, construction, etc. makes the task of monitoring the state of structures (SHM – structural health monitoring technology) very relevant. One of the most promising approaches is the use of fiber optic sensors as part of the monitoring system. Fiber optic sensors compared to classical sensors have a number of significant advantages.

This review article shows the variety of applications of fiber-optic embedded sensors in the field of aircraft structures made of polymer composite materials, and in the civil sphere. Considered promising fiber optic systems. The areas of application of such systems and the directions of their development are shown.

Keywords: system of embedded monitoring, fiber optic monitoring system, structural health monitoring, fiber Bragg grating, polymer composite material, FRP, interrogator.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Достижение принципиально новых эксплуатационных и технических показателей в области авиационной, военной и специальной техники является стратегически важной задачей. Приоритетными направлениями развития материалов и технологий

являются [1–4]: «умные» конструкции, полимерные композиционные материалы (ПКМ), металлические и неметаллические материалы с памятью формы, математические методы моделирования свойств материалов и конструкций и другие.

Значительное увеличение применения композиционных материалов, в том числе в авиационно-космической технике, а также в других областях, требующих повышенной надежности конструкций [5, 6], таких как нефтедобывающая, строительная и др., делает задачу мониторинга состояния конструкций (технология SHM – structural health monitoring) весьма актуальной [7–9]. Создание и применение «умных» материалов [10, 11], в том числе и с адаптивными свойствами, также требует применения более совершенной системы мониторинга состояния. Такая система должна своевременно выявлять дефекты в конструкции, адекватно реагировать на их наличие и выдавать соответствующие воздействия или рекомендации [12].

Одним из наиболее перспективных подходов является использование оптоволоконных датчиков в качестве составной части системы мониторинга. Оптоволоконные датчики по сравнению классическими имеют ряд существенных преимуществ:

- малую массу;
- высокую чувствительность;
- электромагнитную совместимость;
- возможность объединения в сети, а также мультиплексирования;
- совместимость с конструкциями из ПКМ;
- возможность измерения множества величин.

Большим преимуществом оптоволоконных датчиков также является возможность измерения множества параметров:

- деформации, давления и силы;
- электрических и магнитных полей;
- звука и вибрации;
- pH и вязкости;
- наличия биологических молекул, бактерий и т. д.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4].

Классификация оптоволоконных датчиков

Интерферометрические датчики (interferometric sensors):

- интерферометр Фабри–Перо (Fabry–Perot);
- интерферометр Маха–Цендера (Mach–Zender);
- интерферометр Майкельсона (Michelson);
- интерферометр Саньяка (Signac).

Датчики на основе решеток (Grating-based sensors – FBG):

- волоконная брэгговская решетка (Fiber Bragg grating – FBG);
- длиннопериодная волоконная решетка (Long period grating – LPG);
- чирпированная брэгговская решетка (Chirped Fiber Bragg grating);
- наклонная брэгговская решетка (Tilted Fiber Bragg grating);

Распределенные датчики (Distributed optical fibre sensor – DOFS).

- рамановское рассеяние (Raman scattering);
- рэлеевское рассеяние (Rayleigh scattering);
- бриллюэновское рассеяние (Brillouin scattering).

Прочие оптоволоконные датчики:

- для поверхностного плазмонного резонанса (Surface Plasmon Resonance Fiber-Optic Sensors);
- фотонно-кристаллическое оптическое волокно (Photonic-Crystal Fibers for Sensing);
- жидкокристаллическое оптическое волокно (Liquid Crystal Optical Fibers).

Интерферометрические датчики

Наиболее распространенными волоконно-оптическими схемами являются волоконные интерферометры Маха–Цендера, Мейкельсона, Фабри–Перо, Саньяка. Использование резонатора на пути проходящего излучения является отличительной особенностью интерференционных сенсоров. Совмещение или разделение излучений производится с помощью оптоволоконных разветвителей и зеркал, которыми являются диэлектрические покрытия, в том числе и многослойные, нанесенные на торец оптоволокна [13].

За счет возникающего явления интерференции света возможно определение соответствующих параметров материала или происходящих в нем процессов [14–16]. Этот способ позволяет измерять сверхмалые деформации с высокой частотой, что позволяет регистрировать акустические волны в материале.

Разрешение датчиков Фабри–Перо составляет до 0,000015%, диапазон рабочих деформаций $\pm 0,1\%$ и температур – от -40 до $+250^\circ\text{C}$ [17]. Датчики Фабри–Перо имеют небольшие линейные размеры и, как правило, длину от 1 до 20 мм. С помощью этих датчиков возможно регистрировать как ультразвуковые колебания, так и акустическую эмиссию. Для выявления повреждений структуры в авиационных конструкциях из ПКМ возможно применение таких датчиков для регистрации акустических волн.

Волоконная брэгговская решетка (Fiber Bragg Sensing Technology)

Общие положения

Чувствительным элементом точечного оптоволоконного датчика является волоконная брэгговская решетка (ВБР). Волоконная брэгговская решетка отражает излучение с определенной длиной волны и является прозрачной для остальных длин волн. Такое селективное отражение достигается путем создания периодической структуры в сердечнике оптоволокна. Отраженный сигнал регистрируется приемной аппаратурой [18, 19].

Внешнее воздействие на ВБР приводит к изменению параметров решетки Брэгга, что в свою очередь приводит к изменению длины волны, отраженной от нее. По этому изменению можно судить о необходимых характеристиках – деформации, температуре, давлении.

Датчики на основе ВБР не имеют электронных компонентов, т. е. являются пассивными. Это открывает широкие возможности по применению таких датчиков во взрывоопасных зонах и в зонах с сильными электромагнитными помехами.

На одном оптоволокне может быть создано множество брэгговских решеток. Каждая из них будет отражать излучение на собственной длине волны. Это позволяет создавать распределенную систему мониторинга с мультиплексированием по длине волны.

Преимущества датчиков на основе ВБР:

- широкий диапазон измерений;
- возможность интегрировать датчик в объект контроля;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- удобство мультиплексирования;
- нечувствительность к электромагнитным помехам;
- устойчивость к действию окружающей среды [20].

*Системы опроса оптоволоконных датчиков
на основе брэгговских решеток*

Основной принцип работы датчика на основе брэгговских решеток – это выделение информации из отраженного от решетки света. Для этого применяются специальные устройства, называемые интеррогаторами, которые измеряют сдвиг отраженной волны и преобразуют его в электрический сигнал [21–25].

По принципу преобразования длины волны интеррогаторы делятся на следующие типы преобразователей:

- длина волны–амплитуда;
- длина волны–частота;
- длина волны–фаза;
- длина волны–время;
- длина волны–смещение.

**Распределенные оптоволоконные датчики
(Distributed Sensing Technology)**

При распределенном методе измерения сам оптоволоконный кабель является распределенным чувствительным элементом, т. е. датчиком (рис. 1). Метод основывается на регистрации вынужденного комбинационного рассеяния. Рассеянный сигнал регистрируется приемной аппаратурой [26, 27].

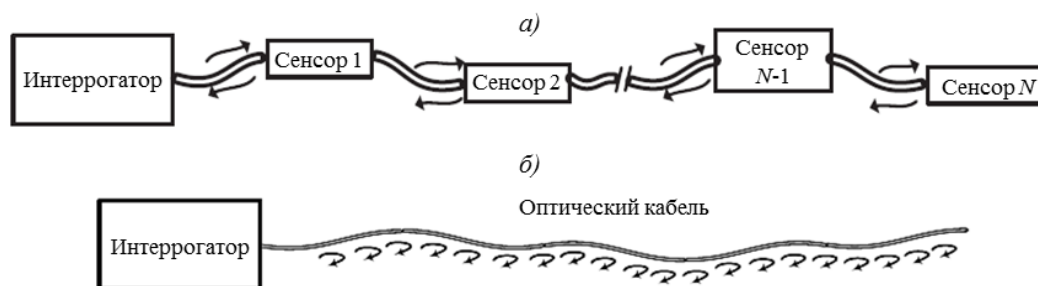


Рис. 1. Система оптоволоконных датчиков:

а – оптоволоконные датчики на основе брэгговской решетки; *б* – распределенные оптоволоконные датчики [26]

Существует несколько способов обработки сигналов при использовании распределенного датчика: оптовременная рефлектометрия на основе рассеяния Рэлея (optical time-domain reflectometry – OTDR), оптовременная рефлектометрия на основе рассеяния Рамана (Raman optical time-domain reflectometry – ROTDR) и оптовременная рефлектометрия на основе рассеяния Бриллюэна (Brillouin optical time-domain reflectometry – BOTDR).

Метод OTDR основан на рэлеевском рассеянии, вызываемым прохождением света по оптоволокну. Рассеянный сигнал регистрируется фотодетектором.

Метод ROTDR основан на рамановском рассеянии. В данном случае в рассеянном сигнале появляются составляющие спектра, которые отсутствовали в излученном сигнале – стоксовская и антистоксовская компоненты. По соотношению интенсивностей этих компонент возможно определить температуру оптоволокну в любой точке.

Метод BOTDR основан на рассеянии Бриллюэна. О деформации и температуре оптоволокну, также как и при других методах, можно судить по частоте рассеянного света [28, 29].

Свойства оптоволокна можно варьировать в широких пределах, что позволяет получить оптоволокна со свойствами, удовлетворяющими требованиям в зависимости от области применения.

Применение оптоволоконных методов для мониторинга структурной целостности конструкций

Акустическая эмиссия

В настоящее время прослеживается непрерывная тенденция увеличения использования композиционных материалов в конструкции самолетов. Однако повреждения в конструкциях из ПКМ выявлять значительно сложнее, чем в металлических, – трещины и расслоения в материале могут возникать без видимых повреждений поверхностных слоев [30]. С помощью мониторинга акустической эмиссии можно выявлять появление таких внутренних повреждений, анализируя исходящие от них звуковые волны, а также определять их расположение [30]. Обычные пьезо-акустические датчики мало применимы в авиакосмической области из-за своей чувствительности к электромагнитным помехам, массивных соединительных кабелей, сложности с мультиплексированием и невозможности применения во взрывоопасных зонах [31].

Применение оптоволоконных распределенных систем для мониторинга акустической эмиссии лишено вышеуказанных недостатков. Возможна также локализация источника акустической эмиссии. Для этих целей в работе [32] применен один из методов искусственного интеллекта, а именно – метод опорных векторов (Support Vector Regression – SVR) [33].

Локализация дефектов

Мониторинг состояния конструкций является критически важной задачей для обеспечения безопасности, выявления повреждений и предсказания срока службы конструкции – особенно в аэрокосмической, нефтегазодобывающей и других областях.

Среди различных методов волны Лэмба имеют значительный потенциал выявления повреждений и дефектов – благодаря чувствительности к малым повреждениям и возможности их распространения на сравнительно большие расстояния.

Применение оптоволоконных датчиков на основе брэгговских решеток для детектирования волн Лэмба, в том числе в качестве фазированной решетки, показано в статье [34]. Имея малые размеры и массу, такой датчик может работать в жестких условиях эксплуатации – при большой влажности, под водой, при высоких температурах, а также может быть встроен в структуру композиционного материала [35]. Возможна также генерация звука с помощью оптоволокна и источника лазерного излучения.

Измерение температуры

Наряду с мониторингом механических напряжений измерение температуры является одной из основных задач, решаемых с помощью оптоволоконных датчиков. Измерение температуры производится с использованием как оптоволоконных датчиков на основе брэгговских решеток, так и распределенных оптоволоконных датчиков [14, 36]. Типичными сферами применения оптоволоконных датчиков температуры являются системы пожарного оповещения, термический контроль силовых кабелей и линий электропередач, контроль температуры химических процессов, обнаружение утечек в трубопроводах. Возможно также встраивание такого датчика в изделия из ПКМ и измерение его температурного поля.

Мониторинг напряжений и деформаций

Мониторинг механических напряжений внутри конструкций является одной из наиболее часто решаемых задач с помощью оптоволоконных датчиков [37–44].

В настоящее время наиболее доступными являются сенсоры на основе волоконной брэгговской решетки, принцип работы которой основан на изменении ее периода под воздействием внешних факторов. К такому изменению приводит как изменение деформации решетки, так и изменение ее температуры. Без информации о температуре невозможно дать однозначную оценку деформации. Для учета влияния температуры существуют различные способы – например, применение ВБР другого типа или применение ВБР с различными откликами по деформации или температуре [45]. Подобный тип датчиков используется для мониторинга состояния мостов [46], плотин, строений, трубопроводов, нефтегазовых скважин, линий электропередач.

Использование встраиваемой в материал ВБР в качестве датчика сопряжено с определенными трудностями, связанными прежде всего с тем, что в результирующую деформацию решетки вносят свой вклад как аксиальная, так и радиальная компоненты [47].

По значениям напряжений внутри конструкции возможна оценка ее формы, что особенно важно для применения в «умных» конструкциях [48–51]. В аэрокосмической отрасли применение «умных» конструкций сделает возможным создание уникальных устройств для активного управления аэродинамическими потоками, что значительно повысит эффективность и безопасность авиакосмической техники.

В настоящее время появляется новый тип приборов или систем – так называемая «лаборатория в волокне» (Lab-in-fiber). Это связано с появлением возможности формировать элементы электроники, оптоэлектроники и микромеханики в тонком и гибком волокне. Эти системы предоставляют новые возможности при использовании их в качестве сенсоров при мониторинге состояния конструкций, в робототехнике, в диагностике заболеваний, в системах коммуникаций и др.

На рис. 2 представлен образец микромеханической структуры, сформированный в волокне.

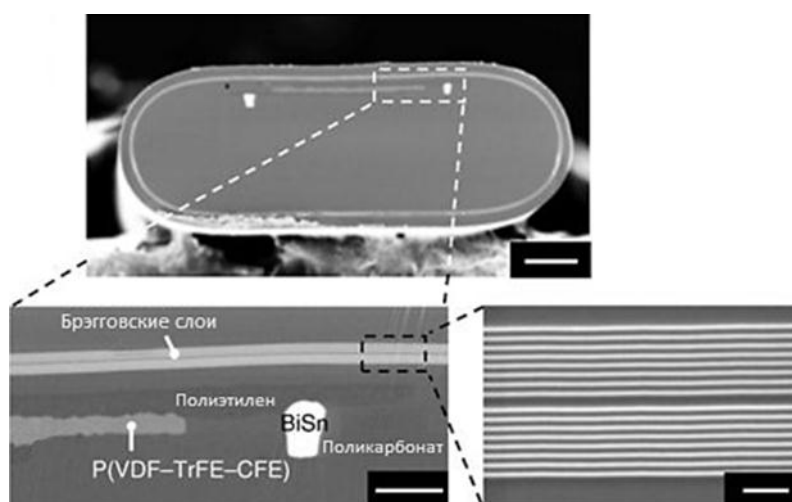


Рис. 2. Микромеханическая структура, созданная в волокне [52, 53]

С помощью фемтосекундного лазера в волокне могут быть также сформированы различные структуры – волноводы, брэгговские решетки, интерферометры, спектрометры, поляризационные элементы, зеркала и др. (рис. 3). Эти структуры могут иметь

различную ориентацию, что может решить проблему трехмерного измерения напряжения и определения формы конструкции с помощью волоконной брэгговской решетки.

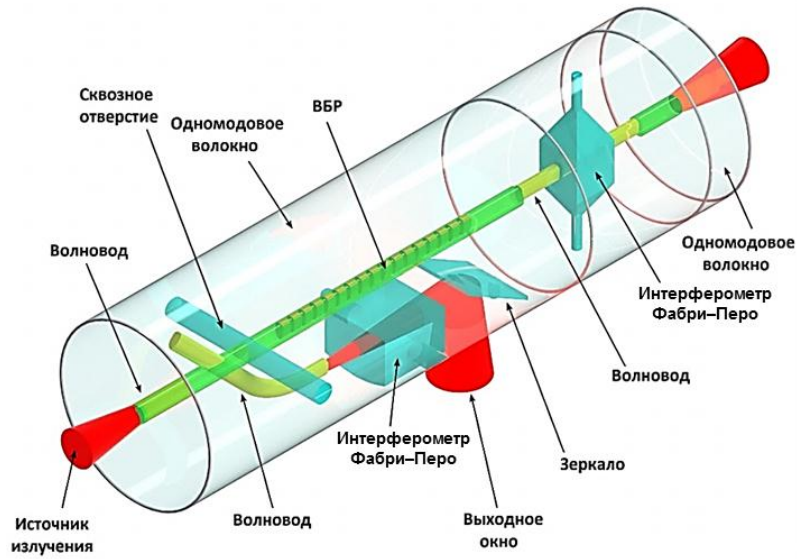


Рис. 3. Варианты структур, формируемых в оптоволокне с помощью фемтосекундного лазера [54]

Благодаря сформированным в волокне волноводам появляется возможность вывести излучение не только через концы оптоволокна. Это открывает широкие возможности для создания распределенных сетей подобных датчиков с разными характеристиками.

В волокно также могут быть встроены элементы микроэлектроники, а именно – транзисторы (рис. 4). Увеличение числа транзисторов и их производительности приведет к созданию дискретных логических элементов, применимых для цифровой обработки сигналов. Возможна также аналоговая обработка сигналов – детектирование, усиление, аналого-цифровое преобразование.

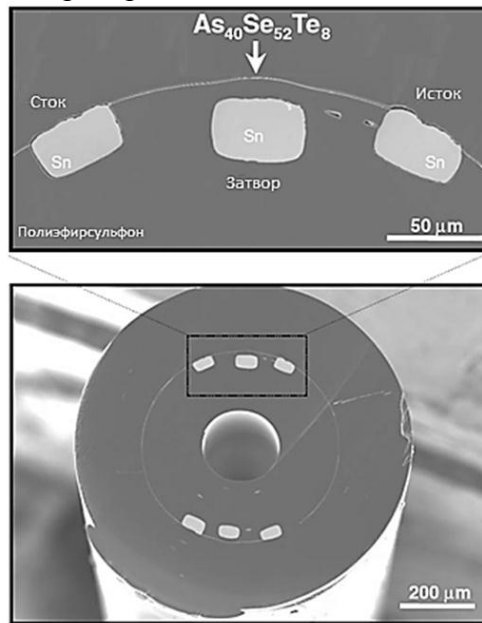


Рис. 4. Структуры элементов микроэлектроники (транзистор), сформированные в волокне [55]

Комплексное развитие таких систем может привести к созданию оптоволоконного сенсора, который не требует интеррогатора или содержит его внутри волокна. Такой датчик может быть встроен в материал и не иметь никаких физических связей с внешним миром, т. е. не будет необходимости выводить датчик наружу и обрабатывать результаты его работы на громоздком оборудовании, что позволит улучшить технологичность и уменьшить цену использования таких датчиков. Результаты замеров будут передаваться по радиоканалу, который также будет встроен в волокно.

Заключения

Использование оптоволоконных датчиков для мониторинга состояния конструкций, в том числе конструкций из ПКМ, является весьма перспективным. Увеличивающееся применение композиционных материалов в авиационной технике, а также создание и применение в будущем «умных» материалов и конструкций, в том числе и с адаптивными свойствами, потребует постоянного совершенствования системы мониторинга состояния конструкции, а также оценки ее геометрической формы, остаточного ресурса и других параметров. Перспективные комплексные системы, формируемые в оптоволокне, сочетающие элементы электроники, оптоэлектроники, микромеханики и фотоники, позволят кардинально изменить способы применения оптоволоконных датчиков в авиационных материалах и конструкциях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
6. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7 (43). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
7. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
8. Guo H., Xiao G., Mrad N., Yao J. Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 3687–3705.
9. Mesquita E., Antunes P., Coelho F. Global overview on advances in structural health monitoring platforms // Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2016. Vol. 6. P. 461–475.
10. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 17–20.
11. Zhu P., Xie X., Sun X., Sotoac M.A. Distributed modular temperature-strain sensor based on optical fiber embedded in laminated composites // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 168. P. 267–273.
12. Sante D.R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 18666–18713.

13. Лиюкумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 1. Волоконно-оптические интерферометры. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 110 с.
14. Yu H., Wang Y., Ma J., Zheng Z., Luo Z., Zheng Y. Fabry-Perot Interferometric High-Temperature Sensing Up to 1200°C Based on a Silica Glass Photonic Crystal Fiber // *Sensors*. 2018. Vol. 18. 273 p.
15. Islam M.R., Ali M.M., Lai M.-H. et al. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review // *Sensors*. 2014. Vol. 14. P. 7451–7488.
16. Lee B.H., Kim Y.H., Park K.S. et al. Interferometric Fiber Optic Sensors // *Sensors*. 2012. Vol. 12. P. 2467–2486.
17. Yoshino T., Kurosawa K., Itoh K., Ose T. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1982. Vol. 4. P. 626–665.
18. Васильев С.А., Медведков И.О., Королев И.Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35. №12. С. 1085–1103.
19. Вялышев А.И., Добров В.М., Долгов А.А. и др. Волоконно-оптические датчики для контроля параметров состояния объектов и окружающей среды в задачах мониторинга // *Природообустройство*. 2014. №3. С. 32–37.
20. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Шелемба И.С. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №3 (48). С. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.
21. Ganziy D., Bang O., Rose B. Technology for Polymer Optical Fiber Bragg Grating Fabrication and Interrogation // *DTU Fotonik*. 2017. 173 p.
22. Cui J., Hu Y., Feng K. et al. FBG Interrogation Method with High Resolution and Response Speed Based on a Reflective-Matched FBG Scheme // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 16516–16535.
23. Ganziy D., Rose B., Bang O. Compact multichannel high-resolution micro-electro-mechanical systems-based interrogator for Fiber Bragg grating sensing // *Applied Optics*. 2017. Vol. 56. P. 3622–3627.
24. Zhang W., Li Y., Jin B. et al. A Fiber Bragg Grating Interrogation System with Self-Adaption Threshold Peak Detection Algorithm // *Sensors*. 2018. Vol. 18. P. 1140.
25. Njegovec M., Donlagic D. High-resolution spectrally-resolved fiber optic sensor interrogation system based on a standard DWDM laser module // *Optics Express*. 2010. Vol. 18. P. 24195–24205.
26. Hartog A.H. An introduction to distributed optical fibre sensors. CRC Press, 2017. 442 p.
27. Bao X., Chen L. Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors // *Sensors*. 2012. Vol. 12. P. 8601–8639.
28. Motil A., Bergman A., Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing // *Optics & Laser Technology*. 2016. Vol. 78. P. 81–103.
29. Wei H., Zhao X., Kong X. et al. The Performance Analysis of Distributed Brillouin Corrosion Sensors for Steel Reinforced Concrete Structures // *Sensors*. 2014. Vol. 14. P. 431–442.
30. Chandarana N., Martinez-Sanchez D., Soutis C., Gresil M. Early Damage Detection in Composites by Distributed Strain and Acoustic Event Monitoring // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 188. P. 88–95.
31. Lan C., Zhou W., Xie Y. Detection of Ultrasonic Stress Waves in Structures Using 3D Shaped Optic Fiber Based on a Mach-Zehnder Interferometer // *Sensors*. 2018. Vol. 18. P. 1–16.
32. Sai Y., Zhao X., Hou D., Jiang M. Acoustic Emission Localization Based on FBG Sensing Network and SVR Algorithm // *Photonic sensors*. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 48–54.
33. Fu T., Zhang Z., Liu Y., Leng J. Development of an artificial neural network for source localization using a fiber optic acoustic emission sensor array // *Structural Health Monitoring*. 2015. Vol. 14 (2). P. 168–177.
34. Tian Z., Yu L., Sun X., Lin B. Damage localization with fiber Bragg grating Lamb wave sensing through adaptive phased array imaging // *SAGE Publications Structural Health Monitoring*. 2019. Vol. 17. Issue 1. P. 334–344.
35. Jiang M., Sai Y., Geng X. et al. Development of an FBG Sensor Array for Multi-Impact Source Localization on CFRP Structures // *Sensors*. 2016. Vol. 16. P. 1770.
36. Yu F., Okabe Y. Fiber-Optic Sensor-Based Remote Acoustic Emission Measurement in a 1000°C Environment // *Sensors*. 2017. Vol. 17. P. 1–14.

37. Дыщенко В.С., Раскутин А.Е., Зуев М.А. Дорожный детектор в системах безостановочного автоматического взвешивания // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5 (41). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-12-12.
38. Махсидов В.В., Яковлев Н.О., Ильичев А.В., Шиенок А.М., Фирсов Л.Л. Определение деформации материала конструкции из ПКМ с помощью интегрированных оптоволоконных сенсоров // Механика композиционных материалов и конструкций. 2016. Т. 22. №3. С. 402–413.
39. Махсидов В.В., Резников В.А. Проекты, направленные на разработку технологии встроенного контроля конструкций из ПКМ // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №5–6 (28). Ст. 04. URL: <http://materialsnews.ru/ru/> (дата обращения: 28.01.2019).
40. Исаев В.Г., Серегин Н.Г., Гречаная Н.Н. Измерение деформаций конструктивных элементов технических систем летательных аппаратов волоконно-оптическими устройствами // Информационно-технологический вестник. 2018. №2 (16). С. 14–24.
41. Вайнштейн Э.Ф., Солодышева Е.С., Криволицкая И.И. Экспериментальное исследование деформационных характеристик полимерных и композиционных материалов при заданных постоянных внешних условиях // Конструкции из композиционных материалов. 2014. №1 (133). С. 52–56.
42. Сарбаев Б.С., Смердов А.А., Таирова Л.П., Селезнев В.А. Исследование деформированного состояния конструкций из композиционных материалов с помощью волоконно-оптических датчиков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №S1. С. 39–51.
43. Ramakrishnan M., Rajan G., Semenova Y., Farrell G. Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials // Sensors. 2016. Vol. 16. P. 1–27.
44. Sierra-Perez J., Torres-Arredondo M.A., Guemes A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison // Composite Structures. 2016. Vol. 135 P. 156–66.
45. Махсидов В.В., Шиенок А.М., Иошин Д.В., Резников В.А. Измерение деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток (обобщающая статья) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 82. №3. С. 54–60.
46. Раскутин А.Е., Махсидов В.В., Смирнов О.И., Кашарина Л.А. Мониторинг нагруженности композитной конструкции арочного моста на основе волоконно-оптических датчиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №3 (63). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.01.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-49-59.
47. Leduc D., Lecieux Y., Morvan P.-A., Lupi C. Architecture of optical fiber sensor for the simultaneous measurement of axial and radial strains // Smart Materials and Structures. 2013. Vol. 22. P. 1–9.
48. Железина Г.Ф., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. Встроенный контроль: от датчиков до информ-композиатов // Авиационная промышленность. 2008. №3. С. 46–50.
49. Федотов М.Ю., Сорокин К.В., Гончаров В.А., Шиенок А.М., Зеленский П.В. Возможности сенсорных систем и интеллектуальных ПКМ на их основе // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №2. С. 18–23.
50. Sun J., Guan Q., Liu Y., Leng J. Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2016. Vol. 27 (17). P. 2289–2312.
51. Sonnenfeld C., Sulejmani S., Geernaert T., Eve S. Microstructured Optical Fiber Sensors Embedded in a Laminate Composite for Smart Material Applications // Sensors. 2011. Vol. 11. P. 2566–2579.
52. Yan W., Page A.G., Nguyen D.T. et al. Advanced Multi-Material Electronic and Optoelectronic Fibers and Textiles // Advanced materials. 2019. Vol. 31. Issue 1. P. 1–28.
53. Khudiyev T., Clayton J., Levy E. et al. Electrostrictive microelectromechanical fibres and textiles // Nature Communications. 2017. Vol. 8. Article number: 1435.
54. Haque M., Lee K., Ho S. et al. Chemical-assisted femtosecond laser writing of lab-in-fibers // Lab on Chip. 2014. Vol. 14. P. 3817–3829.
55. Danto S., Sorin F., Orf N. et al. Fiber Field-Effect Device Via In Situ Channel Crystallization // Advanced materials. 2010. Vol. 22. P. 4162–4166.