

Распределенный волоконно-оптический датчик температуры на основе волоконного лазера ультракоротких импульсов

© Я.Ж. Ососков, А.О. Чернуцкий, Д.А. Дворецкий[✉], С.Г. Сазонкин, И.С. Куделин, И.О. Орехов, А.Б. Пнев, В.Е. Карасик

МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

[✉] e-mail: yan21@mail.ru, ddvoretzkiy@gmail.com

Поступила в редакцию 08.05.2019 г.

В окончательной редакции 08.05.2019 г.

Принята к публикации 04.06.2019 г.

Проведена апробация полностью волоконного эрбиевого лазера ультракоротких импульсов в распределенном волоконном датчике температуры в качестве источника зондирующих импульсов. Перспективами такого подхода являются улучшение отношения сигнал-шум в приемной системе и лучшее пространственное разрешение датчика температуры. В ходе экспериментов выявлены факторы, ограничивающие эффективную длину волоконного датчика температуры, такие как высокая частота следования импульсов и собственные шумы лазера. В результате проведенной работы разработан распределенный волоконно-оптический датчик температуры с разрешением ~ 1.5 К около комнатной температуры, эффективной длиной ~ 3 м и пространственным разрешением ~ 10 см.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние, рефлектограмма рассеяния, стоксова, антистоксова компонента.

DOI: 10.21883/OS.2019.10.48365.161-19

Введение

В 1985 г. Джоном Дэкиным и коллегами была продемонстрирована возможность использования метода оптической временной рефлектометрии (OTDR) для определения температуры на различных участках волоконного кабеля [1]. За несколько десятков лет этому надежному и доступному способу нашлось множество применений: от обнаружения пожаров и утечек в трубопроводах до контроля обледенения летательных аппаратов [2–8].

В таких датчиках воздействие температуры на волоконный кабель приводит к изменению распределения интенсивности обратно рассеянного сигнала по времени. Вследствие этого в измерительных системах на основе оптоволоконных датчиков можно судить о локальном изменении температуры по отклонению рефлектограммы рассеяния от некоторого опорного уровня. В отличие от других типов распределенные волоконные датчики температуры обладают рядом преимуществ, позволяющих использовать их повсеместно: устойчивость к электромагнитным помехам, возможность проводить измерения на больших дистанциях (порядка нескольких километров). Наиболее распространенными источниками излучения зондирующих импульсов для волоконных датчиков температуры были и остаются лазеры с модуляцией добротности (длительность импульсов порядка нескольких десятков наносекунд) или непрерывные лазеры с модуляцией интенсивности. Стоит отметить, что значительная длительность импульсов таких лазерных источников ограничивает эффективное пространствен-

ное разрешение датчика температуры несколькими метрами.

Для повышения метрологических характеристик датчика температуры, работающего на основе комбинационного рассеяния света, в качестве источника излучения предлагается использовать волоконный лазер с синхронизацией мод, так как в этом случае возможно улучшить отношение сигнал-шум в приемной системе за счет сравнительно большей пиковой мощности импульсов и увеличить пространственное разрешение за счет меньшей длительности импульсов. Использование лазера ультракоротких импульсов для сенсора температуры ранее проводилось в работе [9], однако из-за значительной частоты повторений импульсов лазера (~ 36 МГц), при высоком пространственном разрешении (~ 1.2 см) получена малая длина (~ 2.8 м) волоконного датчика температуры. Экспериментальные результаты настоящей работы позволяют сформулировать основные требования к источнику зондирующих импульсов для распределенного датчика температуры с высоким пространственным разрешением при относительно большей длине датчика (от 10 м).

Экспериментальная схема

На рис. 1 приведена схема экспериментального стенда распределенного датчика температуры на основе волоконного лазера ультракоротких импульсов (УКИ). Излучение лазера поступает на волоконный эрбиевый усилитель (erbium doped fiber amplifier, EDFA) с ко-

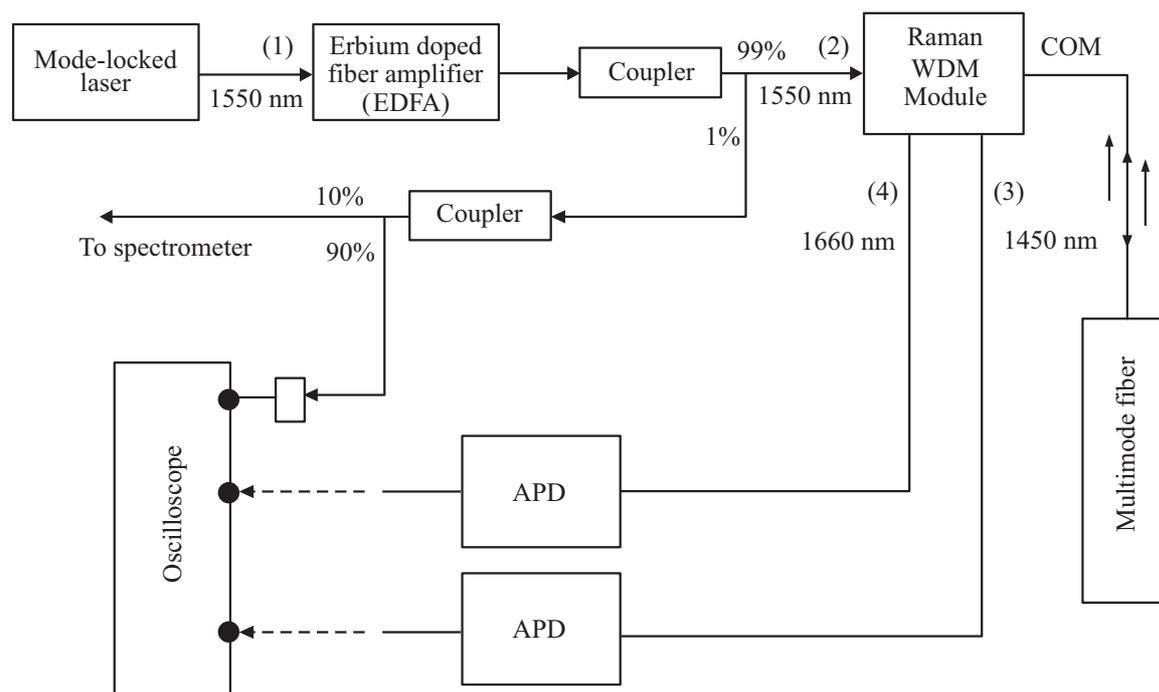


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. Mode-locked laser — лазер УКИ, EDFA — волоконный эрбиевый усилитель, Coupler — волоконный оптический разветвитель с коэффициентами деления 99/1 или 90/10, Raman WDM Module — спектральный демультиплексор, COM — оптический выход, APD — лавинный фотодиод.

эффицентом усиления ~ 10 dB, так что максимальная средняя выходная мощность излучения составила величину ~ 100 mW при длительности импульса менее 100 ps. Далее лазерное излучение через волоконный ответвитель с коэффициентом деления 99/1 поступает в спектральный демультиплексор F-Link Raman WDM Module с полосами пропускания 1450–10, 1550 \pm 15, 1660 \pm 10 nm и через оптический выход COM в многомодовый волновод марки MMF 62.5/125 фирмы Corning с диаметром сердцевины ~ 62.5 μ m и градиентным профилем показателя преломления, длиной ~ 8 km, который в ходе эксперимента находился при комнатной температуре. Оставшийся 1% усиленного излучения делится на дополнительном волоконном разветвителе с коэффициентом деления 10/90, при этом 10% излучения поступает на анализатор спектра Yokogawa AQ6370D (диапазон измерения 600–1700 nm, разрешение 0.02–2 nm, погрешность ± 0.01 nm) для контроля спектра усиленных импульсов и 90% на осциллограф Teledyne LeCroy WaveRunner 6Zi (полоса пропускания 2 GHz, быстродействие 10 GS/s, в режиме непрерывного усреднения) для получения рефлектограммы рассеяния.

В многомодовом волноводе рассеянное обратно излучение, содержащее стоксову и антистоксову компоненты комбинационного рассеяния на длинах волн 1660 и 1450 nm соответственно, поступает на спектральный демультиплексор (Raman WDM Module). В спектральном демультиплексоре излучение разделяется на два

спектральных канала и поступает на фотоприемник на основе лавинного фотодиода (APDI-55, максимальное значение темнового тока $I_D = 5$ nA, типовое значение спектральной чувствительности $S_\lambda = 0.9$ A/W, коэффициент умножения 20 и полоса пропускания 3 GHz для длины волны 1550 nm).

В качестве источника зондирующих импульсов в работе использовался кольцевой полностью волоконный эрбиевый лазер УКИ с высоко нелинейным резонатором [10].

На рис. 2 приведен спектр УКИ с центральной длиной волны 1550 nm и с шириной спектра по полувысоте ~ 22 nm. Автокорреляционная функция по интенсивности УКИ, приведенная на вставке рис. 2, соответствует минимальной длительности импульсов по полувысоте ~ 180 fs. Частота повторения импульсов определяется длиной резонатора и составляет величину 12.2 MHz.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате комбинационного рассеяния в спектре образуются дополнительные линии, которые делятся на стоксовы (сдвинуты к большим длинам волн) и антистоксовы компоненты рассеяния (сдвинуты к меньшим длинам волн). Амплитуда антистоксовой компоненты зависит от локальной температуры и в ~ 10 раз более чувствительна к ней, чем стоксова компонента рассеяния. В то же время учет стоксовой компоненты позво-

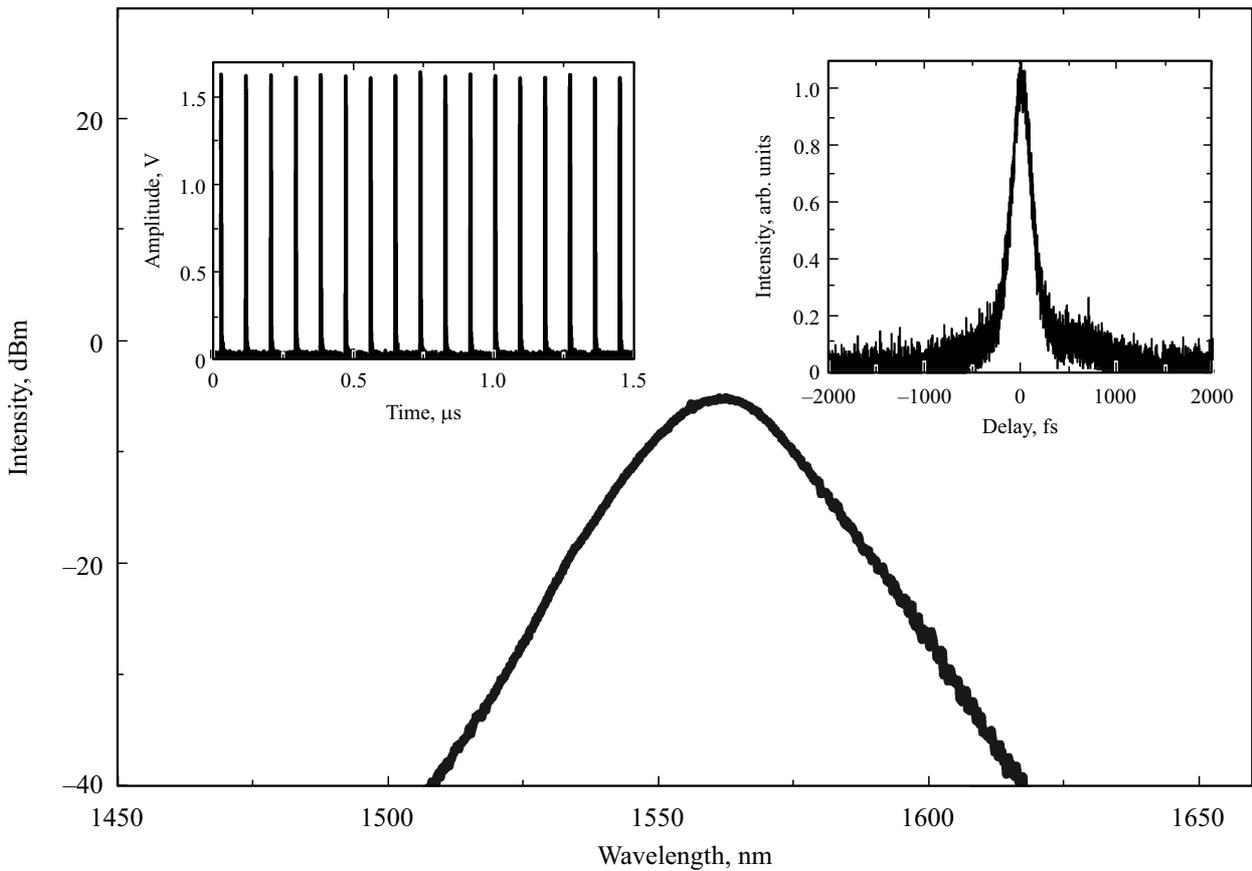


Рис. 2. Выходной спектр источника зондирующих импульсов (на вставках показаны последовательность импульсов и автокорреляционная функция по интенсивности ультракороткого импульса).

ляет нормировать измерения антистоксовой компоненты и, таким образом, сделать измерения независимыми от геометрии волокна, внутренних потерь и т.п. Измерение локальной температуры в любом месте световода вычисляется из отношения интенсивностей антистоксовой и стоксовой компонент рассеяния в соответствии с выражением [11]:

$$R = \frac{I_A}{I_S} = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_A} \right)^4 \exp\left(-\frac{B}{T}\right),$$

где I_A — интенсивность антистоксовой компоненты, I_S — интенсивность стоксовой компоненты, λ_S, λ_A — соответствующие длины волн, T — абсолютная температура, $B = \frac{hc\Delta}{k}$, где Δ — частотный интервал между одной из компонент комбинационного рассеяния и релеевской компонентой ($\sim 440 \text{ cm}^{-1}$ для кварцевого стекла), k — постоянная Больцмана.

Таким образом, благодаря использованию явления обратного комбинационного рассеяния можно определить температуру вдоль оптического волокна как функцию расстояния и времени.

На рис. 3 показаны спектры лазерного импульса после усиления (1), после спектрального фильтра (2) на входе волоконного датчика, антистоксовой (3) и стоксовой (4)

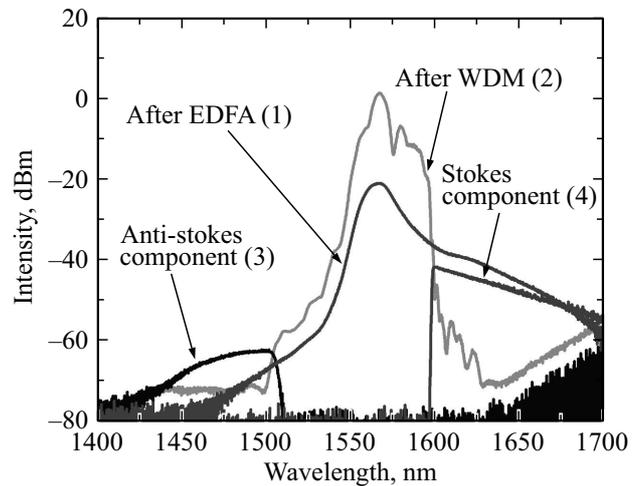


Рис. 3. Спектры импульсов после усиления (1); после спектральной фильтрации (2); антистоксовой (3) и стоксовой (4) компонент комбинационного рассеяния (нумерация соответствует участкам схемы на рис. 1).

компонент комбинационного рассеяния. Нумерация соответствует участкам схемы экспериментального стенда (рис. 1).

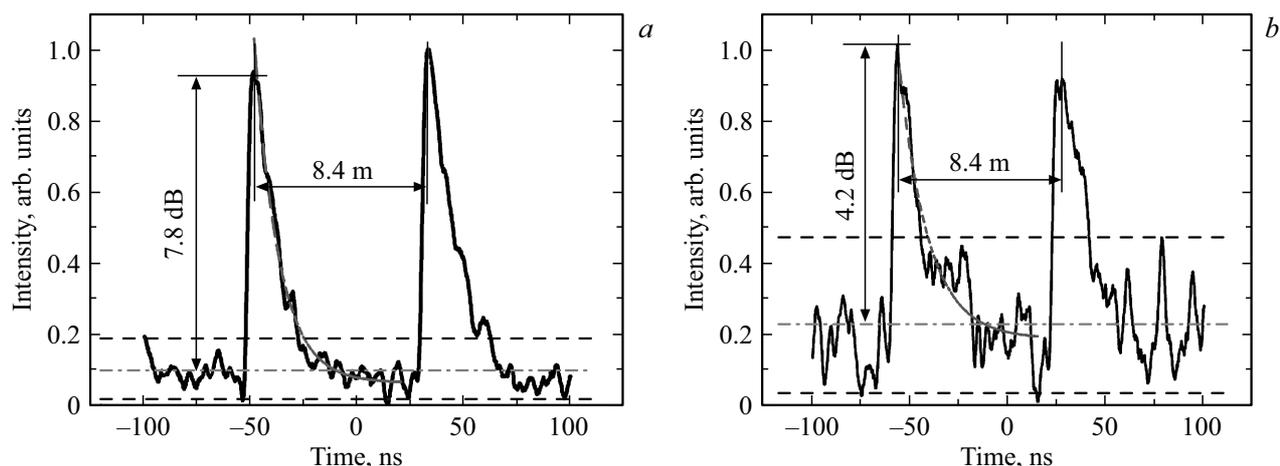


Рис. 4. Временные рефлектограммы рассеяния для стоксовой (а) и антистоксовой (б) компонент; С/Ш ~ 7.8 dB и ~ 4.2 dB соответственно.

Заметим, что спектры (3) и (4) получены в результате спектральной фильтрации обратно рассеянного сигнала и соответствуют антистоксовой и стоксовой компонентам рассеяния. Отметим также, что интенсивность спектральных компонент комбинационного рассеяния (3) и (4) значительно больше интенсивности спектральных компонент лазерного импульса (2) в линии, т.е. не происходит наложения зондирующего и рассеянного излучения в приемной системе.

Полученные рефлектограммы стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния показаны на рис. 4, а и б соответственно. Штрих-пунктирными линиями обозначен средний уровень шума и показано отношение сигнал/шум (С/Ш), равное 7.8 и 4.2 dB для стоксовой и антистоксовой компонент соответственно.

Анализ рефлектограмм рассеяния показывает, что высокая частота следования импульсов (~ 12.2 MHz) лазера ограничивает дальность измерения распределенного волоконного датчика до эффективной длины ~ 10 m. Стоит отметить, что значительно увеличить длину датчика позволит модулятор оптического излучения (например, акустооптический) с частотой модуляции меньшей, чем частота следования импульсов (например, до сотен kHz) [12].

Однако частота следования — это не единственный ограничивающий фактор эффективной длины датчика. Например, если длина волоконного световода значительно больше эффективной длины датчика, происходит наложение рассеянных сигналов от разных участков волоконного световода, что приводит к уменьшению С/Ш рефлектограммы и соответственно увеличению ошибки определения температуры.

С другой стороны, отметим, что высокая зашумленность рефлектограммы рассеяния антистоксовой компоненты (рис. 4, б) в том числе обусловлена высоким уровнем собственных шумов лазерного источника. На рис. 5 показан спектральный относительный уровень шума (RIN) лазерного источника в диапазоне до 1 MHz,

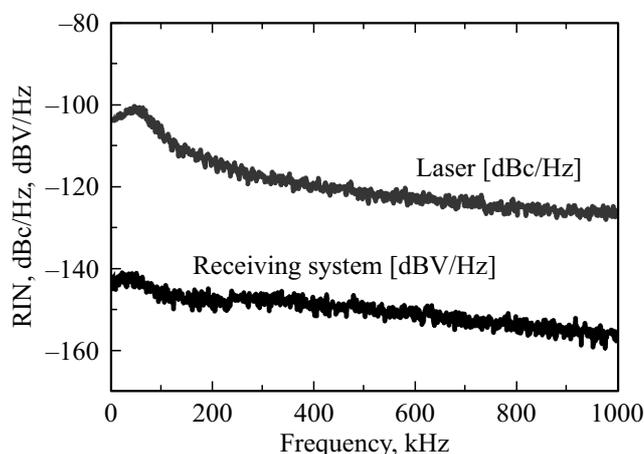


Рис. 5. Относительный уровень шума (RIN) источника и приемника зондирующих импульсов.

при этом интегральный относительный уровень шума составил величину $\sim 6.3 \cdot 10^{-4}$. Отметим также, что уровень рассеянного сигнала антистоксовой компоненты от лазерного источника спадает до уровня шумов приемной системы уже на ~ 3.5 m.

Полученная по экспериментальным данным зависимость температуры волоконного световода от его длины (рис. 6) свидетельствует о постоянстве температуры по всей длине датчика, что соответствует условиям проведения эксперимента. Стоит отметить, что погрешность определения температуры при времени усреднения сигнала ~ 10 s не превышает 1.5 K, однако измерения производились только при комнатной температуре.

На вставке рис. 6 показана зависимость температуры от длины датчика в большем масштабе. Как видно, расстояние между отчетами составляет 2 cm (в соответствии с частотой дискретизации сигнала ~ 10 GS/s), что, однако, не является пространственным разрешением датчика. Ограничивающим фактором в данном случае

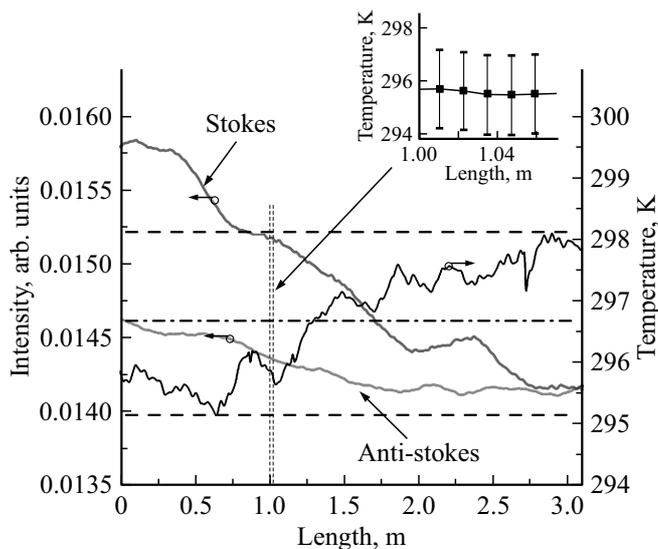


Рис. 6. График распределения температуры по длине волоконного датчика. Показаны стоксова и антистоксова компоненты рассеяния. На вставке — указанный участок в большем масштабе.

выступает полоса пропускания осциллографа (2 GHz), которая в пересчете на длину соответствует максимальному пространственному разрешению ~ 10 см. Следовательно, задача получения лучшего пространственного разрешения за счет меньшей длительности импульсов требует использования осциллографа и фотоприемника с максимальной полосой пропускания: при длительности импульсов 100 ps необходимая полоса приемной системы ~ 10 GHz.

Заключение

Проведена апробация волоконного лазера ультракоротких импульсов в распределенном волоконно-оптическом датчике температуры. В ходе работы выявлены факторы, которые значительно ограничивают эффективную длину датчика температуры. Так, источник зондирующих импульсов должен обладать малым относительным уровнем шума $< 6.3 \cdot 10^{-4}$ и высокой пиковой мощностью лазерного излучения (единицы kW), малой и стабильной частотой следования импульсов до ~ 100 kHz и длительностью импульса ≤ 100 ps. В результате проведенной работы разработан распределенный волоконно-оптический датчик температуры с разрешением по температуре ~ 1.5 K в окрестности комнатной температуры, эффективной длиной ~ 3 м и пространственным разрешением ~ 10 см. Стоит отметить, что для улучшения пространственного разрешения распределенного датчика температуры (до ~ 2 см) требуется полоса пропускания приемной системы ~ 10 GHz.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 19-72-00090.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Dakin J.P. et al. // Electronics Lett. 1985. T. 21. N 13. P. 569–570.
- [2] Glombitza U., Hoff H. // Proc. 13th Int. Conf. Automatic Fire Detection. 2004. P. 1–23.
- [3] Yilmaz G., Karlik S.E. // Sensors and Actuators A: Physical. 2006. V. 125. N 2. P. 148–155.
- [4] Ishii H., Kawamura K., Ono T., Megumi H., Kikkawa A. // Fire Safety J. 1997. V. 29. N 2–3. P. 87–98.
- [5] Giuseffi M., Ferdinand P., Vrain A., Philippe M., Lesueur H. // Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2010. V. 7653. P. 76533P.
- [6] Xiao F., Hulsey J.L., Balasubramanian R. // Structural Control and Health Monitoring. 2017. V. 24. N 11.
- [7] Sang A.K., Froggatt M.E., Gifford D.K., Kreger S.T., Dickerson B.D. // IEEE Sensors J. 2008. V. 8. N 7. P. 1375–1380.
- [8] MacLean A., Moran C., Johnstone W., Culshaw B., Marsh D., Parker P. // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. V. 109. N 1–2. P. 60–67.
- [9] Tanner M.G., Dyer S.D., Baek B., Hadfield R.H., Woo Nam S. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. N 20. P. 20111.
- [10] Dvoretzkiy D.A., Lazarev V.A., Voropaev V.S., Rodnova Z.N., Sazonkin S.G., Leonov S.O., Krylov A.A. // Opt. Expr. 2015. V. 23. N 26. P. 33295–33300.
- [11] Smolen J.J., van der Spek A. // A primer for Oil and Gas Production. Shell. 2003.
- [12] Kotov L.V. et al. // Quant. Electron. 2014. V. 44. N 5. P. 458.