

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

# Одновременное измерение деформации и температуры оптического волокна в гибридном распределенном датчике на основе регистрации рэлеевского и комбинационного рассеяний

Б.Г.Горшков, М.А.Таранов

*Предложен новый тип датчика для одновременного измерения изменений деформации и температуры оптического волокна, действие которого основано на использовании импульсной рамановской рефлектометрии и перестраиваемой по длине волны квазимонохроматической рэлеевской рефлектометрии, реализуемой с помощью микроэлектромеханического фильтра (MEMS). В схеме датчика организованы независимые каналы регистрации комбинационного рассеяния и рассеяния Рэля. В ходе экспериментов продемонстрировано, что при длине контролируемого волокна около 8 км, пространственном разрешении 1–2 м и времени измерения 10 мин уровни шумов (среднеквадратичные отклонения) составили 1.1  $\mu\epsilon$  ( $\text{мкм}\cdot\text{м}^{-1}$ ) для измеренного изменения натяжения (при малых температурных отклонениях) и 0.04 °C для измеренного изменения температуры, что позволяет эффективно измерять механическое и температурное воздействия с повышенной точностью.*

**Ключевые слова:** распределенный датчик, волоконно-оптический датчик, измерение деформации, измерение температуры, рефлектометрия, перестройка длины волны, спектры рассеяния Рэля, комбинационное рассеяние.

## 1. Введение

Волоконно-оптические системы на основе распределенных датчиков перспективны для применений в таких областях, как контроль трубопроводов, мониторинг состояния инфраструктурных объектов (мостов, плотин и т.д.). Одной из актуальных задач является измерение механических деформаций и температуры контролируемого объекта. При этом важнейшая практическая задача состоит в разделении информации о деформациях и температурных воздействиях. В принципе, такая задача решается с использованием бриллюэновской рефлектометрии, когда одновременно с измерением частотного сдвига линий спонтанного бриллюэновского рассеяния регистрируется его интенсивность [1]. Предлагались и иные подходы [2, 3]. Однако характеристики чувствительности подобных систем в большинстве случаев недостаточны. В связи с этим появились работы, посвященные гибридным схемам, например, сочетающие регистрацию бриллюэновского и рамановского рассеянных излучений [4, 5]. В работе [5] достигнуто разрешение по температуре 1.2 °C и по относительной деформации  $10^{-4}$  (100  $\mu\epsilon$ , или 100  $\text{мкм}/\text{м}$ ) для оптического волокна длиной 25 км, что приближается к практическим требованиям, однако недостаточно, например, для мониторинга сооружений гражданской инфраструктуры [6].

Исследования, направленные на достижение более высокой чувствительности, привели к появлению схем перестраиваемой по длине волны квазимонохроматической

рэлеевской рефлектометрии. Впервые идея использования одной из таких схем для измерения деформации была высказана в [7]. В работе [8], где была применена схема TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Time Domain Reflectometry), продемонстрировано разрешение 0.01 °C, эквивалентное приблизительно 0.1  $\mu\epsilon$  по относительной деформации (без разделения воздействий), при пространственном разрешении 1 м. Однако ценой достижения такого результата стал узкий динамический диапазон, составивший 4  $\mu\epsilon$  или 0.44 °C при значительном (3 ч) времени накопления сигнала. Предложенное нами ранее решение [9] позволило зарегистрировать воздействия до 2000  $\mu\epsilon$  или 220 °C при среднеквадратичной ошибке 2  $\mu\epsilon$  (0.22 °C) и общем времени измерения 10 мин при длине волокна 8 км, что уже применимо для мониторинга промышленных объектов [6]. Тем не менее, ни одна из указанных схем (см. [7–9]) не позволяет проводить разделение температурных и механических воздействий.

Цель настоящей работы – исследование новой гибридной схемы для решения задачи одновременного измерения деформации и температуры. Эта схема позволяет одновременно регистрировать спектры рэлеевского рассеяния (как в работе [9]) и мощность спонтанного комбинационного рассеяния, обычно являющегося основой распределенной термометрии. Важные достоинства такой схемы – это возможность работы при доступе к одному концу контролируемого волокна и высокая чувствительность.

## 2. Принцип действия датчика и экспериментальная установка

Принцип действия предлагаемого распределенного датчика основан на двух физических эффектах. Первый заключается в том, что при растяжении–сжатии, а также при нагревании–охлаждении оптического волокна происходит смещение так называемых спектров рассеяния

Б.Г.Горшков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38;  
e-mail: bgorshkov@gmail.com

М.А.Таранов. ООО «ПетроФайбер», Россия, Тульская обл., 301664 Новомосковск, Клинский пр., 7; e-mail: tarma@petrofibre.ru

Поступила в редакцию 19 октября 2017 г., после доработки – 28 ноября 2017 г.

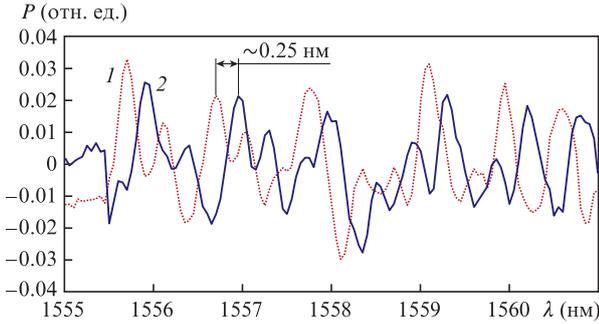


Рис.1. Спектры рассеяния Рэлея без постоянной составляющей, зарегистрированные при перестройке полосы шириной 0.17 нм с шагом 0.05 нм: при начальных условиях (1) и при натяжении 200 це (2). Сдвиг спектров составил ~0.25 нм.

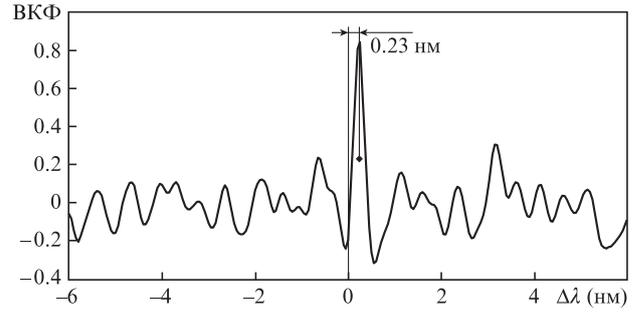


Рис.2. Зависимость приведенной нормированной взаимно корреляционной функции (VKF) спектров, изображенных на рис.1, от смещения по длине волны  $\Delta\lambda$ . Показан сдвиг  $\Delta\lambda$  центра масс главного максимума функции с более точной его оценкой.

Рэлея. Под термином «спектр рассеяния Рэлея» имеется в виду спектр мощности обратно рассеянного излучения с выбранного участка оптического волокна, полученный в результате сканирования по частоте исходного излучения. Аналогично можно определить спектр отражения брэгговской решетки. Типичные спектры рассеяния Рэлея с участка волокна протяженностью 1 м, смещенные друг относительно друга под действием натяжения, представлены на рис.1. Смещение спектра относительно исходного положения пропорционально приложенному воздействию – изменению натяжения или температуры. На рис.2 представлена приведенная нормированная взаимно корреляционная функция исходного и смещенного спектров, изображенных на рис.1. Величина смещения центра масс ее главного максимума относительно нуля оси  $\Delta\lambda$  в числовом выражении равна сдвигу спектров. Таким образом, задача измерения сдвига спектров алгоритмически сводится к расчету положения центра масс их взаимно корреляционной функции. Весьма детально подобная технология описана нами в [9].

Второй эффект, лежащий в основе принципа действия предлагаемого датчика, – спонтанное комбинационное рассеяние, мощность стоксовой и антистоксовой компонент которого существенно зависит от температуры и слабо зависит от деформации оптического волокна [10]. Поскольку антистоксова компонента обладает примерно в 5 раз большей температурной чувствительностью, чем стоксова [10], мы регистрировали именно антистоксову компоненту. Как известно, зависимость ее мощности  $P_{RAS}$

от абсолютной температуры  $T$  имеет вид распределения Бозе–Эйнштейна и математически выражается следующим образом:

$$P_{RAS}(T) \propto \frac{\exp[-h\Delta\nu_R/(k_B T)]}{1 - \exp[-h\Delta\nu_R/(k_B T)]}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\Delta\nu_R$  – частотный сдвиг, составляющий примерно 13 ТГц для кварцевых оптических волокон;  $k_B$  – постоянная Стефана–Больцмана. Вместо закона (1) может быть использована его линейная аппроксимация, полученная методом наименьших квадратов и имеющая максимальную ошибку не более  $0.07^\circ\text{C}$  в диапазоне температур  $25\text{--}45^\circ\text{C}$ , в пределах которого и проводились измерения.

Принимая во внимание вышесказанное, можно утверждать, что, измерив одновременно сдвиг спектров  $\Delta\lambda$  рассеяния Рэлея, а также изменение мощности  $\Delta P_{RAS}^N$  антистоксовой компоненты, нормированное на ее мощность при начальных условиях, и решив матричное уравнение вида

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta P_{RAS}^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\epsilon^A & S_T^A \\ S_\epsilon^{RAS} & S_T^{RAS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (2)$$

относительно изменения деформации  $\Delta\epsilon$  и температуры  $\Delta T$ , получим искомые величины воздействий на оптическое волокно. Данный алгоритм реализован в предлагаемом датчике. В матричном уравнении (2)  $S_\epsilon^A$  и  $S_T^A$  – чувствительности к деформации и температуре смещения

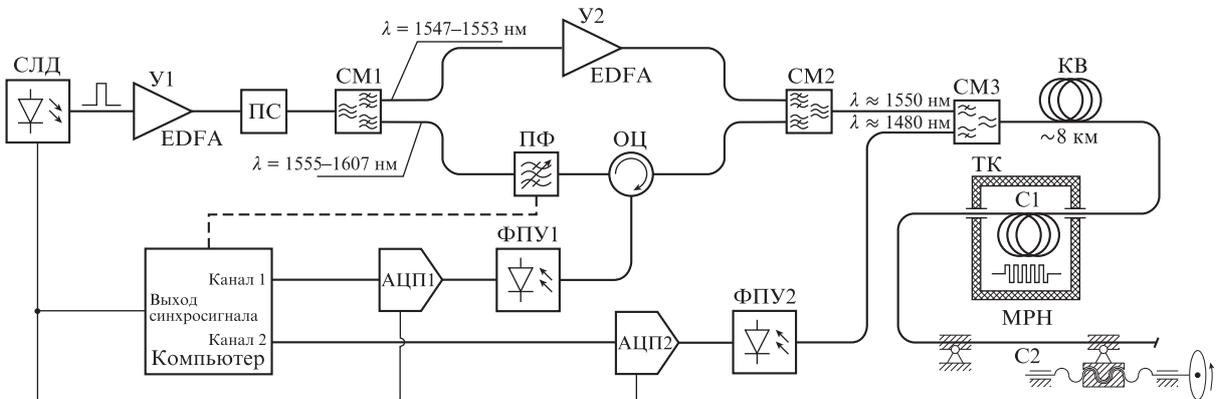


Рис.3. Схема распределенного датчика деформации и температуры: СЛД – суперлюминесцентный диод; У1, У2 – усилители; ПС – поляризационный скремблер; СМ1, СМ2 и СМ3 – спектральные мультиплексоры; ПФ – перестраиваемый фильтр; ОЦ – оптический циркулятор; АЦП1, АЦП2 – аналого-цифровые преобразователи; ФПУ1, ФПУ2 – фотоприемные устройства; КВ – контролируемое волокно; ТК – термокамера; С1, С2 – сегменты; МРН – механизм регулировки натяжения.

спектров рассеяния Рэлея соответственно,  $S_e^{RAS}$  и  $S_T^{RAS}$  – чувствительности к деформации и температуре нормированной антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния соответственно.

На рис.3 приведена схема экспериментальной установки. В качестве источника исходного импульсного излучения использовался суперлюминесцентный диод SLD-761 (Superlum). Ширина спектра излучения по уровню полу-максимума (FWHM) интенсивности составляла около 45 нм, длина волны максимума интенсивности – приблизительно 1560 нм. Длительность импульса была 10.5 нс, что позволило получить пространственное разрешение около 1 м без учета дисперсии волокна; частота следования импульсов определялась длиной контролируемого волокна, составлявшей около 8 км, и была равной 12 кГц. Для усиления мощности СЛД использовался усилитель У1 на основе оптического волокна, легированного эрбием. Для устранения нестабильности показаний датчика, возникающей вследствие наличия двулучепреломления в контролируемом волокне (КВ), в схему был включен поляризационный скремблер ПС PSM-002 (General Photonics).

Одними из важнейших элементов данной схемы являются тонкопленочные спектральные мультиплексоры СМ1 и СМ2 одного и того же типа, используемые в качестве направленных спектральных фильтров для разнесения каналов регистрации рэлеевского и комбинационного рассеяний (соответственно Канал 1 и Канал 2). Через верхнее плечо, образованное соответствующими портами обоих мультиплексоров и имеющее окно пропускания 1547–1553 нм, осуществляется подача исходного излучения для канала регистрации комбинационного рассеяния. Размещенный в плече усилитель У2 на основе волокна, легированного эрбием, используется для компенсации потери мощности, отфильтрованной СМ1 в нижнее плечо, которое образовано портами с диапазоном пропускания 1555–1607 нм и содержит канал регистрации рассеяния Рэлея. Выбор портов с данным диапазоном пропускания для организации рэлеевского канала обусловлен тем, что максимум спектра излучения после У1 приходится на длину волны 1558 нм, попадающую в интервал 1555–1607 нм. Канал включает перестраиваемый спектральный фильтр (ПФ), нечувствительный к поляризации оптический циркулятор (ОЦ) и фотоприемное устройство (ФПУ1). ПФ представляет собой модуль DiCon MTF500B на основе микроэлектромеханической системы (MEMS), управляющей взаимным положением зеркал, и дифракционной решетки в составе устройства. Полный диапазон перестройки фильтра составляет 1529–1564 нм, ширина полосы пропускания по уровню полумаксимума интенсивности – 0.17 нм. ФПУ1, в состав которого входят фотоприемник и трансимпедансный усилитель (ТИА), имеет полосу пропускания шириной 50 МГц.

Параметры перестраиваемой фильтрации – диапазон перестройки и ее шаг – во многом определяют точностные свойства и быстродействие датчика. Поскольку максимум мощности в спектре излучения, подаваемого на вход ПФ, приходится на длину волны 1558 нм, выбран диапазон перестройки  $1558 \pm 3$  нм. Используя данные, приведенные в работе [8], можно оценить, что перестройка в интервале  $\pm 3$  нм соответствует диапазонам  $\pm 2500$  мк и  $\pm 275^\circ\text{C}$  изменений деформации и температуры. Однако конечность диапазонов регистрации спектров рассеяния Рэлея обуславливает уменьшение амплитуд их взаимно корреляционных функций с увеличением деформации и

температуры вплоть до уровня шумоподобных флуктуаций. На данный уровень, в свою очередь, влияет число отсчетов в спектрах рассеяния Рэлея; его увеличение ведет к снижению уровня флуктуаций. С другой стороны, чем меньше число отсчетов, тем выше быстродействие. За количество отсчетов в спектрах отвечает шаг перестройки ПФ. Он выбран равным 0.05 нм, что составляет примерно 1/3 от ширины полосы пропускания фильтра (0.17 нм) и позволяет получать контрастные взаимно корреляционные функции при приемлемом общем числе шагов, равном 121. Выбор шага, приблизительно равного или превышающего ширину полосы пропускания ПФ, привел бы к получению слабо- или некоррелируемых спектров рассеяния Рэлея и, следовательно, к невозможности расчета сдвигов этих спектров. Таким образом, можно утверждать, что для известной ширины окна пропускания ПФ существует некое квазиоптимальное значение шага перестройки, при котором достигается как высокий контраст взаимно корреляционных функций, так и приемлемое быстродействие датчика.

СМ3 служит одновременно направленным спектральным фильтром и средством организации рефлектометрического канала для комбинационного рассеяния. Коротковолновый порт СМ3 имеет диапазон пропускания 1450–1490 нм; а длинноволновый – 1530–1580 нм. Также в состав канала регистрации комбинационного рассеяния входит ФПУ2, аналогичный по характеристикам ФПУ1.

Функцию интерфейса ФПУ1 и ФПУ2 с компьютером осуществляют 8-разрядные аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2 соответственно, работающие с частотой  $10^8$  преобразований в секунду. Компьютер осуществляет управление ПФ, а также сбор и накопление измерительных данных, по которым по окончании спектрального сканирования производится расчет измеряемых воздействий.

Помимо перечисленных устройств в состав схемы входит одномодовое контролируемое волокно (КВ) марки Corning SMF-28e длиной приблизительно 8 км, на оконечном участке которого выделены сегменты С1 длиной около 35 м (помещен в термокамеру) и С2 длиной 9 м (закреплен в опорах механизма регулировки натяжения МРН). МРН представляет собой систему из двух опор, одна из которых неподвижно закреплена на общем основании, а вторая – на гайке механизма «винт-гайка», вращением ручки которого регулируется расстояние между опорами. На каждой из опор шарнирно закреплено по одной плоской металлической пластине с прямолинейно наклеенным на нее волокном. Таким образом, приняты все меры для исключения изгибных потерь.

### 3. Эксперимент

Эксперимент по измерению деформации и температуры проводился в следующей последовательности:

- 1) регистрация опорных спектров рассеяния Рэлея, а также опорной антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния при начальных условиях ( $25^\circ\text{C}$ , натяжение отсутствует);
- 2) нагревание С1 до  $45^\circ\text{C}$  и растяжение С2 до 200 мк без изменения температуры;
- 3) регистрация спектров рассеяния Рэлея и антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния;
- 4) расчет разностных сигналов  $\Delta\lambda$  и  $\Delta P_{RAS}^N$  с последующим определением коэффициентов чувствительности,

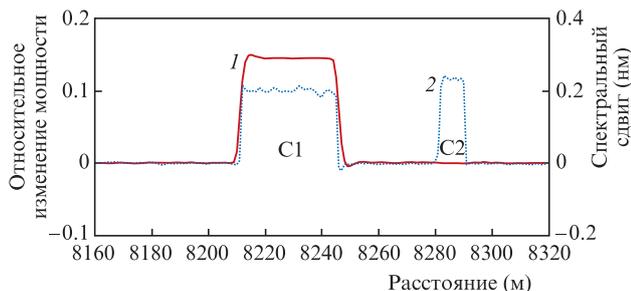


Рис.4. Относительное изменение мощности антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния  $\Delta P_{\text{RAS}}^{\text{N}}$  (1), а также сдвиги спектров рассеяния Рэлея  $\Delta\lambda$  (2) в зависимости от расстояния от начала КВ.

входящих в матричное уравнение (2) (воздействия на участках C1 и C2 измерены независимым способом);

5) решение уравнения (2) относительно изменения деформации  $\Delta\epsilon$  и температуры  $\Delta T$ .

Время измерения как опорных, так и текущих спектров составило 10 мин.

На рис.4 показаны графики полученных сигналов  $\Delta\lambda$  и  $\Delta P_{\text{RAS}}^{\text{N}}$ . Поскольку температурное и механическое воздействия были приложены соответственно к участкам C1 и C2 независимо, определение коэффициентов чувствительности матричного уравнения (2) сводится к расчету отношений средних уровней сигналов  $\Delta\lambda$  и  $\Delta P_{\text{RAS}}^{\text{N}}$  в пределах данных участков к соответствующим изменениям температуры ( $20^\circ\text{C}$ ) и натяжения ( $200\ \mu\epsilon$ ). В результате вычислений получены следующие значения:

$$\begin{aligned} S_{\epsilon}^{\Delta} &= 1.2\ \text{пм}\cdot\mu\epsilon^{-1}; \quad S_T^{\Delta} = 11\ \text{пм}\cdot^\circ\text{C}^{-1}; \\ S_T^{\text{RAS}} &= 7.2 \times 10^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Эти значения близки к приведенным в работах [8–10].

Из рис.4 видно, что изменение мощности антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния  $\Delta P_{\text{RAS}}^{\text{N}}$  (кривая 1, участок C2) малочувствительно к деформации, в силу чего расчет  $S_{\epsilon}^{\text{RAS}}$  с удовлетворительной точностью в рамках настоящей работы невозможен. Целесообразно воспользоваться значением, полученным нами ранее [10]:

$$S_{\epsilon}^{\text{RAS}} = -1.6 \times 10^{-6}\ \mu\epsilon^{-1}. \quad (4)$$

На рис.5 приведены расчетные зависимости  $\Delta\epsilon$  и  $\Delta T$ , полученные в результате решения уравнения (2) с учетом (3) и (4). Среднеквадратичные уровни шумов, рассчитанные в интервале 7600–8200 м, составили  $1.1\ \mu\epsilon$  и  $0.04^\circ\text{C}$  для изменения деформации и температуры соответственно.

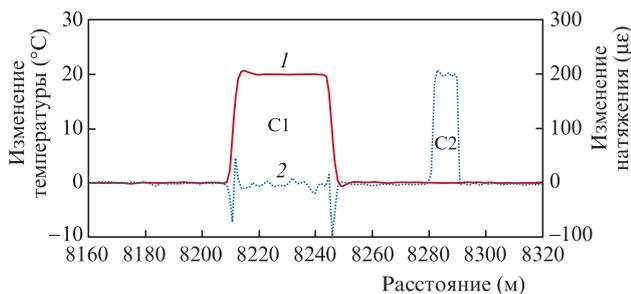


Рис.5. Результаты одновременного измерения изменений температуры  $\Delta T$  (1) и натяжения  $\Delta\epsilon$  (2) в соответствии с данными рис.4.

Артефакты, представляющие собой существенные по амплитуде выбросы вычисленного изменения натяжения на границах C1 (рис.5), где фактически отсутствовали механические деформации, объясняются несовпадением крутизны фронтов сигналов  $\Delta\lambda$  и  $\Delta P_{\text{RAS}}^{\text{N}}$  (см. рис.4). Различная крутизна фронтов обусловлена дисперсией волокна и принципиально различными способами обработки сигналов для рэлеевского и комбинационного каналов. Представляется вероятным, что имеющие место на практике температурные и механические воздействия не будут иметь столь резких пространственных фронтов, как в наших экспериментах, что позволит избежать появления подобных артефактов. Не исключено, что артефакты могут быть минимизированы в результате совершенствования алгоритмов обработки данных.

Помимо артефактов, в пределах C1 наблюдаются паразитные шумоподобные флуктуации  $\Delta\epsilon$ , среднеквадратичное отклонение которых составляет  $6\ \mu\epsilon$  (вычислено на участке без артефактов от отметки 8213 до 8244 м), что существенно превышает рассчитанное отклонение на отрезке 7600–8200 м, где отсутствовали воздействия на волокно, т.е.  $1.1\ \mu\epsilon$ . Установлено, что указанные флуктуации линейно нарастают по мере роста температурных изменений относительно эталонной записи. Полагая линейную зависимость среднеквадратичного отклонения данных флуктуаций от изменения температуры, несложно оценить коэффициент их температурной чувствительности, составляющий приблизительно  $0.24\ \mu\epsilon\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ . Указанное значение можно рассматривать как дополнительную температурную погрешность. По нашим наблюдениям погрешности всегда растут по мере удаления измеряемых воздействий от условий, в которых был записан эталон. Этот факт мы приписываем особенностями корреляционной обработки.

## 4. Заключение

В работе экспериментально продемонстрирована возможность раздельного измерения температурных изменений и продольных деформаций оптического волокна с помощью гибридного распределенного датчика, основанного на регистрации антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния и спектров рэлеевского рассеяния, получаемых с помощью перестройки частоты зондирующего излучения микроэлектромеханическим фильтром с компьютерным управлением. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности практического применения предложенной схемы для мониторинга состояния инфраструктурных объектов.

1. Parker T.R., Farhadiroushan M., Handerek V.A., Rogers A.J. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, **9**, 979 (1997).
2. Alahbabi M.N., Cho Y.T., Newson T.P. *Opt. Lett.*, **29**, 26 (2004).
3. Liu X., Bao X. *J. Lightwave Technol.*, **30**, 1053 (2012).
4. Alahbabi M.N., Cho Y.T., Newson T.P. *Opt. Lett.*, **30**, 1276 (2005).
5. Bolognini G., Soto M.A., Pasquale F.D. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, **21**, 1523 (2009).
6. Kishida K., Yamauchi Y., Guzik A. *Photonic Sensors*, **4**, 1 (2014).
7. Froggatt M., Moore J. *Appl. Opt.*, **37**, 1735 (1998).
8. Koyamada Y., Imahama M., Kubota K., Hogari K. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 1142 (2009).
9. Gorshkov B.G., Taranov M.A., Alekseev A.E. *Laser Phys.*, **27**, 085105 (2017).
10. Gorshkov B.G., Gorshkov G.B., Taranov M.A. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 015103 (2016).