

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ РЕФРАКТОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С ФАЗОВЫМ $\pi$ -СДВИГОМ

### FIBER OPTIC REFRACTOMETERS BASED ON BRAGG GRATINGS WITH PHASE $\pi$ -SHIFT

V. Kazarov  
O. Morozov

#### Annotation

This article discusses the development of fiber optic refractometers of parallel type based on two Bragg gratings with the  $\pi$ -phase shift, one of which is etched in the contact zone with the test substance. The possibility of additional control of tensile/compression deformation of the structural elements, in which the test substance is, by third grating, incorporating in the refractometer, and increase of measurement resolution by creating ring gratings with the  $\pi$ -phase shift and Fano resonance forming in them.

**Keywords:** fiber optic refractometer of parallel type, Bragg grating with phase  $\pi$ -shift, measurement of tensile/compression deformation, ring Bragg grating with phase  $\pi$ -shift, resolution, Fano resonance.

**Казаров Виталий Юрьевич**  
Аспирант, Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ  
**Морозов Олег Геннадьевич**  
Д.т.н., Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ

#### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы развития волоконно-оптических рефрактометров параллельного типа на основе двух брэгговских решеток с фазовым  $\pi$ -сдвигом, одна из которых вытравлена в зоне контакта с исследуемым веществом. Показана возможность дополнительного контроля деформации растяжения/сжатия структурных элементов, в которых находится исследуемое вещество, за счет включения в рефрактометр третьей решетки и повышения разрешающей способности измерений за счет создания кольцевых решеток с фазовым  $\pi$ -сдвигом и формирования в них резонанса Фано.

#### Ключевые слова:

Волоконно-оптический рефрактометр параллельного типа, брэгговская решетка с фазовым  $\pi$ -сдвигом, кольцевая брэгговская решетка с фазовым  $\pi$ -сдвигом, измерение деформаций растяжения/сжатия, разрешающая способность, резонанс Фано.

#### Введение

Волоконно-оптические рефрактометры (ВОР) на основе брэгговских решеток (БР) стремительно развиваются последние десятилетия, находя широкое применение для классификации исследуемого вещества, определения его компонентного состава, контроля малых и сверхмалых концентраций растворов и т.д. [1]. Среди рассматриваемых в настоящей статье приложений следует выделить [2] определение типа и качества электролитов в аккумуляторах, его укрупненного долевого состава, а также малых концентрации, растворенных в нем солей.

Информация в ВОР характеризуется величиной сдвига центральной длины волны БР в зависимости от изменения коэффициента преломления внешней оболочки волокна, сформированной в чувствительной зоне исследуемым веществом. Указанные выше процессы отличаются динамикой измерений, которая находится в преде-

лах от единиц секунд (определение типа) до единиц минут (определение сверхмалых концентрации), и определяет требования к метрологическим, конструктивным и эксплуатационным характеристикам ВОР.

Основные на сегодняшний день проблемы ВОР [3], требующие быстрого и технологичного решения, могут быть отражены следующими требованиями: увеличение разрешающей способности; повышение чувствительности; формирование стабильных по амплитуде и чистоте спектра зондирующих излучений; выделение рефрактометрической информации из комплекса одновременно влияющих на показания ВОР параметров, определяемых универсальностью отклика БР на изменение давления, температуры и коэффициента преломления; построение датчиков точечного типа и распределенных сетей на их основе.

Частные решения указанных проблем нашли отражение в настоящей статье для указанных выше приложений

в части улучшения разрешающей способности и расширения функциональных возможностей.

**1. Разрешающая способность ВОР на базе БР с фазовым сдвигом**

Для достижения высокой разрешающей способности в различных сенсорных системах на основе БР применяются как сами решетки, анализ сдвига центральной длины волны которых проводится по узкополосным особенностям их спектральных характеристик, так и более сложные конфигурации, например, интерферометр Фабри–Перо (ИФП) на базе двух БР, характеризующийся наличием очень узкого резонанса и который на сегодняшний день наиболее широко используются на практике [4]. Однако в ВОР наиболее приемлемо использование таких решеток, как решетки с фазовым  $\pi$ -сдвигом, которые характеризуются более узким резонансом пропускания, размерами, сравнимыми с размером одной решетки, и высокой чувствительностью к изменению коэффициента преломления оболочки или окружающей среды.

На рис. 1 схематично показаны структуры ВОР с вытравленной оболочкой на базе БР (а), в конфигурации ИФП на базе двух БР с вытравленным резонатором (б) и полным травлением по всей длине (в), а также на базе БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом (г).

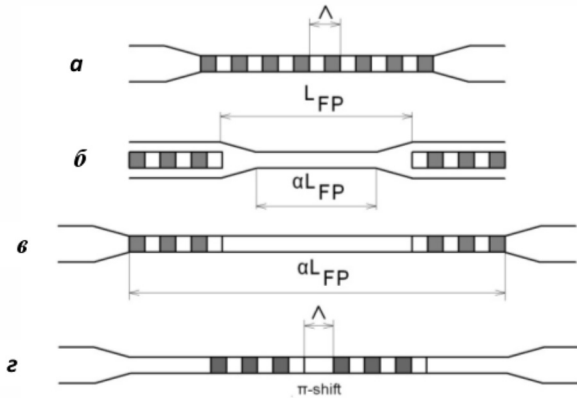


Рисунок 1. Типы чувствительных элементов ВОР.

Для ВОР на базе БР (рис. 1,а) центральная длина волны полосы отражения  $\lambda_B$  определяется как

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

где

$\Lambda$  – период БР, определяемый фазовой маской,  
 $n_{eff}$  – эффективный коэффициент преломления БР.

Коэффициент преломления исследуемого материала (окружающей ВОР среды)  $n_{amb}$  может быть определен по измеренной  $\lambda_B$  и известным коэффициенте преломления

сердцевины  $n_{co}$  и радиусе  $a_{cl}$  оболочки вытравленного волокна по процедуре [4].

Чувствительность ВОР на базе БР может быть определена следующим образом

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{amb}} \right) \Delta n_{amb}. \quad (2)$$

Для ИФП с вытравленным резонатором (рис.1,б) при условии постоянства его длины  $L_{FP}$  резонансная длина волны  $\lambda_{FP}$  определяется следующим выражением

$$m\lambda_{FP} = 2n_{eff}L_{FP} \quad (3)$$

где  $m$  – номер моды.

При изменении коэффициента преломления исследуемого материала  $n_{amb}$  эффективный коэффициент преломления изменяется на величину  $\Delta n_{eff}$  а резонансная длина волны  $m$ -ой моды сдвигается на величину  $\Delta\lambda_{FP}$ . Из (3) можно получить

$$\Delta\lambda_{FP} / \lambda_{FP} = \alpha \Delta n_{eff} / n_{eff}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – доля оптической длины резонатора ИФП, вытравленная при изготовлении датчика.

Достоинством такого типа датчика является линейный характер зависимости сдвига резонансной длины волны от изменения эффективного показателя преломления и наличие узкополосного резонансного пика, обеспечивающего измерение коэффициента преломления с высоким разрешением.

Однако для ВОР наиболее существенной является зависимость сдвига центральной длины волны от изменения коэффициента преломления окружающей среды

$$\frac{\Delta\lambda_{FP}}{\lambda_{FP}} = \alpha \left( \frac{\Delta n_{amb}}{n_{eff}} \right) \left( \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{amb}} \right) \quad (5)$$

Оценки, проведенные нами [5], и результаты, приведенные в работах других авторов [1, 4], показали, что величина чувствительности ВОР в конфигурации ИФП с вытравленным резонатором меньше, чем чувствительность ВОР на базе БР. На основе данных указанных источников предельно детектируемое изменение коэффициента преломления для первого типа ВОР от двух до десяти раз меньше, чем для второго и составляет соответственно  $\sim 10^{-5}$  и  $\sim 10^{-6}$  RIU [4]. Компенсировать указанную разницу можно при изготовлении ВОР в конфигурации ИФП с травлением по полной оптической длине (рис.1,в).

Тогда полная чувствительность ВОР будет определяться комплексным откликом БР и фазовым сдвигом резонатора ИФП, не ухудшая при этом значения указанного для решеток Брэгга.

Недостатком приведенного решения является появление нелинейной зависимости между сдвигом длины волны и изменением коэффициента преломления, однако сохраняется значительное увеличение в разрешающей способности рефрактометрических измерений. Реально достижимая полуширина резонансного спектра ВОР в конфигурации ИФП составляет по данным [4] 0,025 нм, а для БР – 0,5 нм. Это значит, что разрешающая способность ИФП ВОР в 20 раз лучше, чем у датчика на одной БР.

Развивая данный подход нами в [5] был предложен ВОР параллельного типа на основе БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом, который представляет собой два оптических волокна с записанными в них идентичными решетками. Одна из решеток вытравлена и выполнена как простейший ИФП с длиной резонатора, не превышающей  $\lambda_B$  (рис.1,г). Полуширина резонансного пика решетки, полученная нами, составила 0,01 нм [5], что свидетельствовало об увеличении разрешающей способности измерений в 50 раз по сравнению с датчиком на базе классической БР.

Дальнейшее повышение разрешающей способности может быть достигнуто при использовании (рис. 2) кольцевого резонатора (RR) с встроенной в него БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом ( $\pi$ -FBG) [6].

В отличие от обычной БР спектральный отклик такого резонатора характеризуется асимметричным двойным расщеплением резонансной характеристики, состоящей из правого бокового резонанса, имеющего асимметричный профиль Фано, и левого бокового резонанса, имею-

щего симметричный профиль Лоренца. Правый резонанс Фано характеризуется более узким и острым пиком, чем все другие виды резонансов, достижимые с использованием как традиционных кольцевых резонаторов, так и БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом. Уменьшение резонансной ширины линии достигает в такой структуре до пяти порядков и составляет сотые доли пм или десятки кГц. Теоретическое разрешение измерений может составить  $10^{-9}$  RIU, что на три-четыре порядка выше, чем достигнутое в [5] –  $1,3 \times 10^{-5}$  RIU и [4] –  $10^{-6}$  RIU.

Основной проблемой съема информации о центральной длине волны или частоте данного типа резонанса является его узкополосность. Основная масса применений ВОР отличается использованием для зондирования БР широкополосных источников излучения и высокобюджетных оптических анализаторов спектра для регистрации информационных сигналов. При переходе к ВОР со сверхузкой индикационной полосой их использование становится не оптимальным и вызывает необходимость применения модуляционных методов измерений, практика реализаций которых в данной области пока ограничена, только применением для зондирования двухчастотных или полигармонических излучений, сформированных по методу Ильина-Морозова [7–9].

Однако данные методы использовались с применением лазеров с шириной линии излучения в десятки кГц. Поэтому необходимость использования сверхузкополосных лазеров для характеристики резонанса Фано представляет собой актуальную задачу для дальнейших исследований.

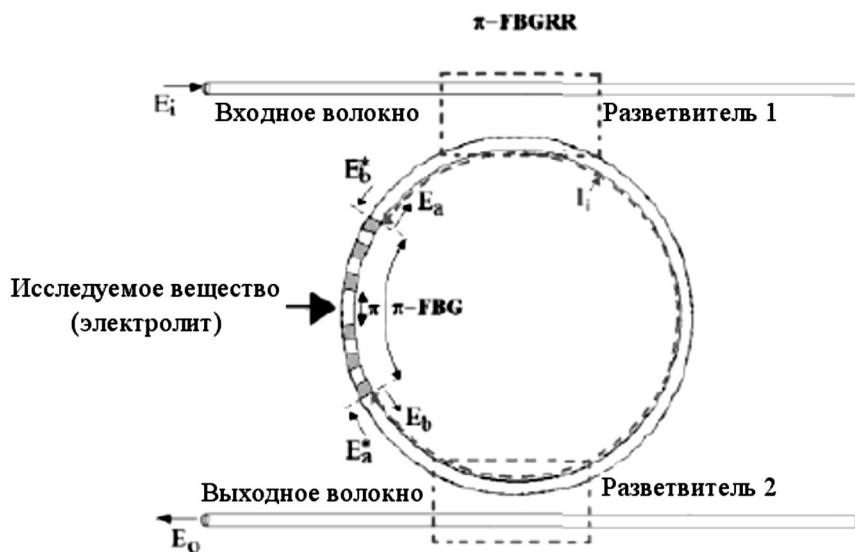


Рисунок 2. Кольцевой резонатор с встроенной БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом ( $\pi$ -FBGRR).

**2. ВОР параллельной структуры на базе трех БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом**

Существенная чувствительность БР к температурным изменениям и деформациям растяжения/сжатия приводит к значительным погрешностям ВОР в измерении показателя преломления (ПП). В связи с этим актуальной становится задача одновременного измерения как ПП, так и температуры и величины деформаций растяжения/сжатия.

Одна из частных задач исследований в области эксплуатации аккумуляторных батарей – повышение точности и достоверности измерения, плотности электролита при изменении температуры окружающей среды от  $-60$  до  $+60^\circ\text{C}$ , а также разработка способа, позволяющего автоматизировать процесс измерения и максимально упростить конструкцию устройства в составе системы диагностирования, например, свинцовых аккумуляторов, для обеспечения непрерывного контроля плотности электролита в течение срока их эксплуатации на основе ВОР.

Температура также является одним из наиболее важных параметров, указывающим на выход из строя батареи литий ионных аккумуляторов, но даже в самых современных системах управления батареями не предусмотрен контроль распределения температуры по всему аккумулятору [3]. Поэтому дополнительным параметром, который может свидетельствовать о температурном профиле, может служить изменение размеров (объема) аккумуляторной батареи. Оба указанных параметра, также как и ПП, могут быть одновременно проконтролированы с помощью ВОР контроля рабочих характеристик аккумулятора, состоящего из нескольких БР с фаз.  $\pi$ -сдвигом.

Решение задачи одновременного измерения ПП и температуры было предложено нами в [5]. При этом использовался двухчастотный метод зондирования как ее центрального лоренцевского контура пропускания, так и внешнего гауссова контура отражения. Обработка сигнала велась для огибающих на соответствующих промежуточных частотах для каждого из контуров. При этом формируется двухконтурная система измерений с "грубым" гауссовским и "точным" лоренцевским контурами.

Центральные длины волн решеток БР1 и БР2 при одинаковой температуре отличаются в силу вытравливания в БР2 оболочки волокна на определенную глубину. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования двух источников двухчастотного излучения, настроенных соответственно на средние длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , и решения уравнения раздельно для температуры и коэффициента преломления аналогично задаче для двоянных решеток [9].

В этом случае расстройкам, полученным при двухчас-

тотном зондировании на каждой из длин волн, не ставится в соответствие какой-либо из физических параметров, а проводится дополнительная процедура вычислений по следующим алгоритмам.

Выходные сигналы  $U_{R1}$  и  $U_{R2}$  для огибающих на промежуточных частотах описываются следующими выражениями

$$U_{R_1} = \delta_{T_1}(\lambda_1)T + \delta_{n_{eff,1}}(\lambda_1)n_{eff}, \quad (6)$$

$$U_{R_2} = \delta_{T_2}(\lambda_2)T + \delta_{n_{eff,2}}(\lambda_2)n_{eff}, \quad (7)$$

где  $\delta_{T_1}(\lambda_1)$ ,  $\delta_{n_{eff,1}}(\lambda_1)$ ,  $\delta_{T_2}(\lambda_2)$ ,  $\delta_{n_{eff,2}}(\lambda_2)$

– известные коэффициенты на измерительных характеристиках, соответствующие зависимостям расстройки решеток, предварительно настроенных на длины волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  по температуре и эффективному ПП.

Отсюда

$$T = \frac{U_{R1}\delta_{n_{eff,2}}(\lambda_2) - U_{R2}\delta_{n_{eff,1}}(\lambda_1)}{\delta_{T_1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff,2}}(\lambda_2) - \delta_{T_2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff,1}}(\lambda_1)}, \quad (8)$$

$$n_{eff} = \frac{U_{R2}\delta_{T_1}(\lambda_1) - U_{R1}\delta_{T_2}(\lambda_2)}{\delta_{T_1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff,2}}(\lambda_2) - \delta_{T_2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff,1}}(\lambda_1)}. \quad (9)$$

Эти математические вычисления выполняются в программном блоке ВОР и позволяют одновременно получить значения параметров температуры и эффективного коэффициента преломления в зоне расположения БР1 и БР2.

С учетом деформаций растяжения/сжатия Брэгговская длина волны ВРБ меняет свое значение в зависимости от приложенных к ней температуры и натяжения:

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 - P_e) \in +(\xi_S + \alpha_S)\Delta T, \quad (10)$$

где

$P_e$  – коэффициент фотоупругости;

$\xi_S$  – термооптический коэффициент ( $\sim 7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ );

$\alpha_S$  – коэффициент теплового расширения ( $\sim 5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ) волокна.

Известные значения разрешающей способности по температуре и натяжению соответственно составили  $0,5^\circ\text{K}$  и  $1 \text{ мкМ/м}$ .

С учетом рассмотренных положений нами предложена параллельная структура ВОР, аналогичная [5], но состоящая из трех ВРБ (рис. 3).

Поскольку решетки расположены параллельно и в одном месте, идентичны по размерам и комплексированы через разветвитель, то они воспринимаются как одна ре-

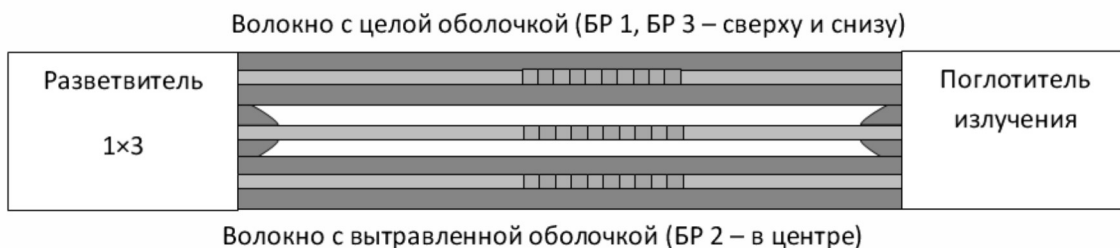


Рисунок 3. Структурная схема ВОР параллельной структуры из трех решеток.

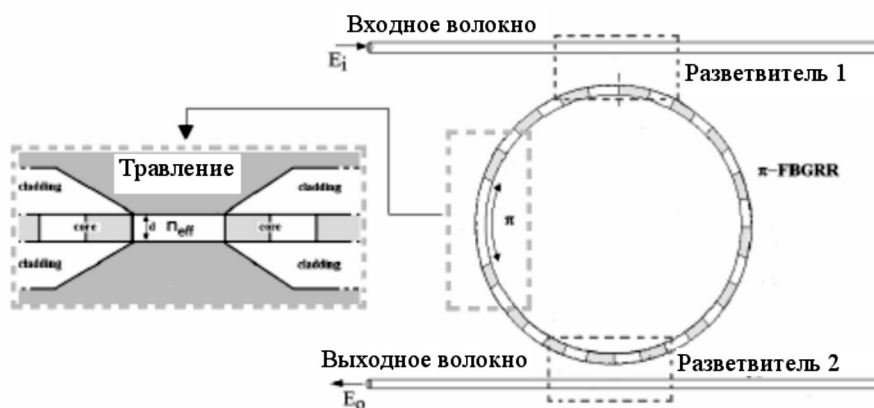


Рисунок 4. Выравненная кольцевая БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом.

шетка. Центральные длины волн решеток БР1, БР3 и БР2 при одинаковой температуре отличаются в силу выравливания в БР2 оболочки волокна на определенную глубину. Если решетка БР3 для контроля размера электрода жестко будет к нему прикреплена, то ее длина волны также будет отличаться и от центральной длины волны БР1. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования полигармонического источника зондирующего излучения (комб-генератора) [10], настроенного соответственно на средние длины волн  $\lambda_1, \lambda_2$  и  $\lambda_3$ , и решения уравнений раздельно для температуры и коэффициента преломления (6)–(9) и аналогично для температуры и растяжения электрода.

Подобный ВОР может быть изготовлен и на кольцевых структурах в различных вариантах. Вертикальная конфигурация: БР1 крепится на электрод, БР2 выполняется выравненной (рис. 4), БР1, БР2 и БР3 располагаются друг над другом, но так, чтобы БР2 и БР3 были изолированы от деформаций БР1. Горизонтальная конфигурация: решетки расположены так, что БР2 и БР3 в зоне измерения смотрят навстречу друг другу, а чувствительная зона решетки БР1 направлена в их сторону или установлена параллельно БР3.

### 3. Формирование зондирующего излучения

Как было показано в предыдущем разделе, для зондирования ВОР параллельного типа из двух или трех решеток необходимо сформировать двухчастотное излучение на средних длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  или  $\lambda_1, \lambda_2$  и  $\lambda_3$ . Наиболее простым вариантом для такого формирования является использование двухпортового модулятора Маха-Цендера.

Напряженность поля сигнала на его выходе описывается следующим выражением:

$$E_{out}(t) = 0,5E_{in} \left[ \exp(j\Delta\phi_1(t)) + \exp(j\Delta\phi_2(t)) \right] \cdot \exp(j\omega_0 t), \quad (11)$$

где  $\Delta\phi_1(t)$  and  $\Delta\phi_2(t)$  – фазовые сдвиги в первом и втором портах (плечах) модулятора,

$E_{in}$  – амплитуда входного оптического сигнала. Фазовые сдвиги определяются воздействием модулирующих

сигналов  $V_i(t)$  и заданными рабочими точками на склоне модуляционной характеристики модулятора ( $i=1, 2$  – номер порта (плеча) модулятора):

$$\Delta\phi_i(t) = \frac{\pi}{U_\pi} (V_i(t) + V_{bias\ i}), \quad i = 1, 2. \quad (12)$$

Найдем передаточную функцию модулятора через отношение напряженностей выходного сигнала к входному с учетом устранения фазового чирпа модулятора  $V_1(t) = V_2(t)$ , получим:

$$\Psi = \cos(X \cos(\omega_{RF}t + \Delta\phi/2)) \cos(Y) + \sin(X \cos(\omega_{RF}t + \Delta\phi/2)) \sin Y, \quad (13)$$

где  $X = \pi \cdot V \sin(\Delta\phi/2) / U_\pi$ ,

$$Y = \pi \cdot \Delta V_{bias} / 2U_\pi, \quad \Delta V_{bias} = V_{bias1} - V_{bias2},$$

$V$  – амплитуда модулирующего сигнала,  $\omega_{RF}$  – радиочастота модуляции.

Приняв в выражении (13)  $\sin Y = 1$ , получим

$$\pi \cdot \Delta V_{bias} / 2U_\pi = \pi/2, \text{ или } \Delta V_{bias} = U_\pi.$$

Тогда

$$\Psi = \sin(X \cos(\omega_{RF}t + \Delta\phi/2)) = -2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(X) \sin((2k+1)\omega_{RF}t). \quad (14)$$

Приняв  $\Delta\phi = \pi$ , получим  $X = (\pi V) / U_\pi$ .

После элементарных математических преобразований, принимая во внимание соотношение для  $X$ , получим выражение для напряженности выходного оптического излучения, которая будет определяться функциями Бесселя 1-го рода  $[2k+1]$ -порядка:

$$\begin{aligned} E_{out}(t) &= -2E_{in} \sin(\omega_0 t) \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(X) \sin((2k+1)\omega_{RF}t) = \\ &= E_0 J_1(X) [\cos(\omega_0 + \omega_{RF})t - \cos(\omega_0 - \omega_{RF})t] + \\ &+ E_0 J_3(X) [\cos(\omega_0 + 3\omega_{RF})t - \cos(\omega_0 - 3\omega_{RF})t] + \\ &+ E_0 J_5(X) [\cos(\omega_0 + 5\omega_{RF})t - \cos(\omega_0 - 5\omega_{RF})t] + \dots \end{aligned} \quad (15)$$

Таблица 1.

Параметры модуляции и выходного излучения модулятора.

Параметры модуляции и амплитуда	Количество спектральных составляющих $N$			
	Две	Четыре	Шесть	Восемь
$X$	1,84	3,05	5,31	7,90
$J_1(X)$	0,582	0,319	0,346	0,220
$J_3(X)$	0,105	0,319	0,302	0,289
$J_5(X)$	-	0,046	0,300	0,210
$J_7(X)$	-	-	0,073	0,314

Из (15) видно, что несущая частота  $\omega_0$  подавлена, а излучение состоит из двух симметричных полос с нечетными гармоническими составляющими радиочастоты –  $(\omega_0 + (2k+1)\omega_{RF})$  и  $(\omega_0 - (2k+1)\omega_{RF})$ .

Для нечетных гармоник результаты численного моделирования сведены в табл. 1, а результаты моделирования в пакете Optisystem 7.0 представлены соответственно на рис. 5, а–б.

Для демонстрации выбраны: четырехчастотное излучение для ВОР на двух решетках (рис. 5,а) и восьмичастотное для ВОР на трех решетках (рис. 5,б), причем одна из крайних его пар может быть использована для построения опорного канала.

#### 4. Результаты моделирования

Результаты моделирования ВОР показаны на рис. 6.

Детектирование изменений коэффициента преломления может быть проведено на уровне  $10^{-6}$  RIU.

Показанные четыре точки на рис. 6,а соответствуют плотности электролита 1,42, 1,5, 1,62 и 1,7 г/см<sup>3</sup>.

Погрешность измерения температуры (рис. 6,б) составила 0,1°C.

На рис. 7 показано приращение центральной длины волны решетки при измерении деформаций натяжения.

Полученные экспериментально значения трендов показали, что чувствительность БР с фазовым  $\pi$ -сдвигом по температуре составила  $\sim 7,72$  пм/°C, а по давлению  $\sim 0,91$  пм/ $\mu\epsilon$  по центру окна прозрачности.

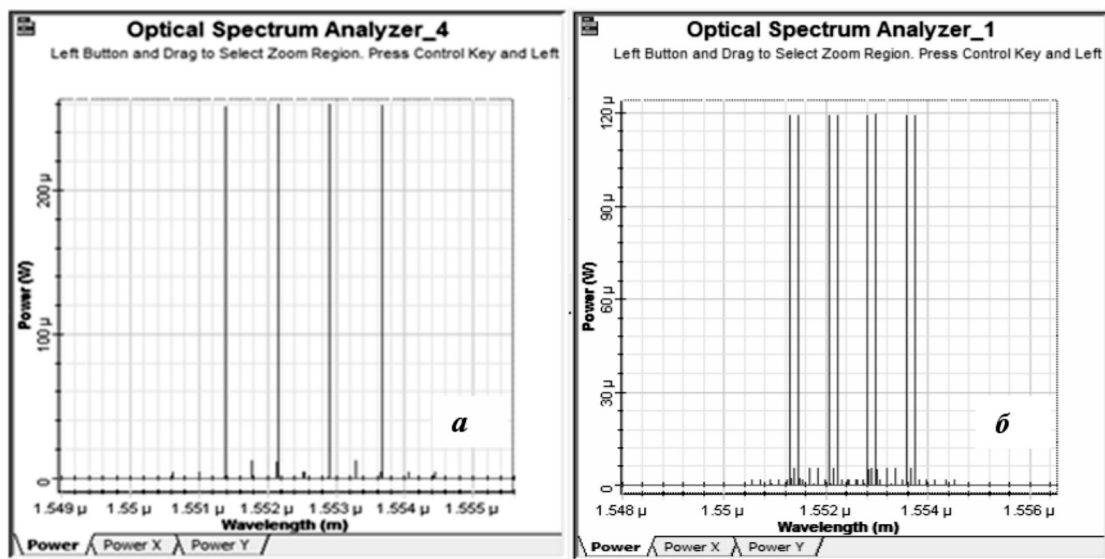


Рисунок 5. Излучение на выходе модулятора (нечетные гармоники):  
а - двухчастотное; б - восьмичастотное.

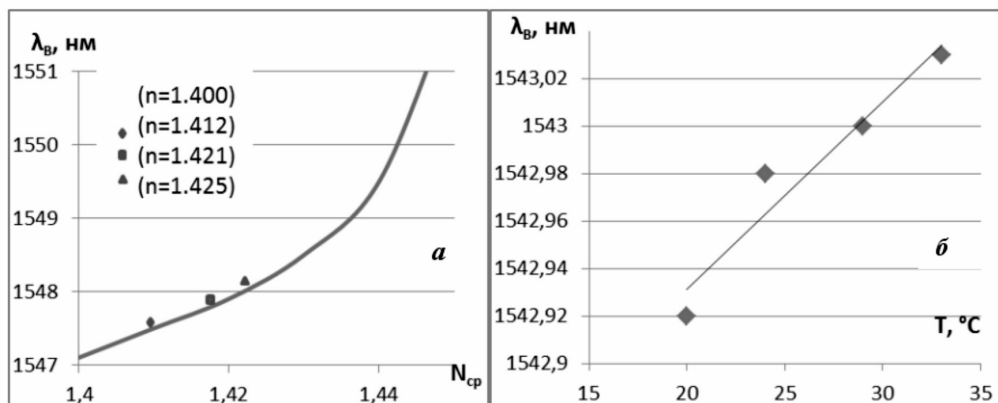


Рисунок 6. Измерительные характеристики ВОР: а - рефрактометр; б - термометр.



Рисунок 7. Измерительная характеристика ВОР по натяжению.

Выводы по работе

В работе рассмотрены задачи развития волоконно-оптических рефрактометров параллельного типа на основе трех брэгговских решеток с фазовым  $\pi$ -сдвигом с целью дополнительного контроля деформаций растяжения/сжатия структурных элементов, в которых находится исследуемое вещество, а также повышения разрешаю-

щей способности измерений до  $10^{-9}$  RIU за счет создания кольцевых решеток с фазовым  $\pi$ -сдвигом и формирования в них резонанса Фано.

Показано решение задачи формирования полигармонических излучений из одночастотного для зондирования трех решеток, и определена задача поиска одночастотного лазера с шириной линии излучения до десятков, сотен Гц.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проектной части госзадания 3.1962.2014 / К "Радиофотоника".

ЛИТЕРАТУРА

1. Asseh A. et al. Fiber optical Bragg grating refractometer // *Fiber Integr. Opt.* 1998. V. 17. No. 1. P. 51–62.
2. Сарварова Л.М. и др. Комплексный подход к решению задач сетевого мониторинга бортовых систем и устройств электроснабжения транспортных средств на основе волоконно-оптических технологий // *Современные проблемы науки и образования.* 2014. № 6. С. 246.
3. Meyer J. et al. Fiber optical sensors for enhanced battery safety // *Proc. of SPIE.* 2015. V. 9480. P. 94800Z.
4. Wei L. et al. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors // *Applied Physics Letters.* 2005. V. 86. P. 151122.
5. Садыков И.Р. и др. Волоконно-оптический рефрактометрический датчик // *Труды МАИ.* 2012. № 61. С. 18.
6. Campanella C.E. et al. Investigation of refractive index sensing based on Fano resonance in fiber Bragg grating ring resonators // *Opt. Express.* 2015. V. 23. No. 11. P. 14301–14313.
7. Морозов О.Г. и др. Амплитудно-фазовые методы формирования зондирующих излучений для систем анализа волоконно-оптических структур // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы.* 2007. Т. 10. № 3. С. 119–124.
8. Насыбуллин А.Р. и др. Радиофотонный синтез сложных радиосигналов с линейной частотной модуляцией // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики.* 2015. №12.
9. Куревин В.В. и др. Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга // *Инфокоммуникационные технологии.* 2009. Т. 7. № 3. С. 46–52.
10. Севастьянов А.А. и др. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера // *Научно-технический вестник Поволжья.* 2013. №4. С.232–236.

© В.Ю. Казаров, О.Г. Морозов, (microoil@mail.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

