

ИНФОРМАЦИОННАЯ СТРУКТУРА, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ БИОСЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ СТРУКТУР

М.Р.Т.М. КAUD, Б.И. Валеев, Т.А. Аглиуллин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

Аннотация. До настоящего времени не предложено простых методов, позволяющих осуществлять достоверный локальный контроль динамики живой клетки, отражающий как ее временной ход, так и интенсивность ее различных метаболических, электрофизиологических и морфологических процессов в норме и патологии. В статье рассматривается задача анализа информационной структуры, чувствительности и погрешностей волоконно-оптических систем контроля параметров биологических объектов микроскопического размера, за счет перехода к применению волоконно-оптических биосенсоров, основанных на комбинированных оптических волоконных структурах, опрос которых осуществляется радиофотонными методами. На примере измерения температуры живой клетки показано что при изменении показателя преломления сердцевины оптического волокна в диапазоне 1.4–1.5 и показателя преломления рабочей области интерферометра Фабри–Перо в диапазоне 1.0–2.2 реально достижимая чувствительность комбинированной структуры составляет от стандартных 11 пм/°С до легко реализуемых на практике 44.2 пм/°С, а при использовании специальных материалов может достигать и 237.5 пм/°С. При этом обеспечивается определение температуры с погрешностью до 0.01 °С.

Ключевые слова: биосенсор, волоконная брэгговская решетка, интерферометр Фабри–Перо, комбинированная оптическая волоконная структура, радиофотонные сенсорные технологии, многопараметрическое воздействие, измерительное преобразование, температура, деформация, биологическое воздействия, информационная структура, чувствительность, погрешность.

Введение

Открытые и закрытые оптоволоконные интерферометры Фабри – Перо используются для контроля изменения диэлектрической и магнитной проницаемости веществ, расположенных в области резонатора [1,2-4] кроме того, открытый резонатор может служить высокоточным датчиком температуры [5,6], когда длина области резонатора изменяется под воздействием внешней температуры.

Однородные и аподизированные волоконные брэгговские решетки используются как в качестве датчиков температуры, так и датчиков деформации или вибрации, когда измерению периода периодической структуры ставится в соответствие величина внешнего воздействия, послужившая причиной изменения периода.

Адресные волоконные брэгговские структуры с дискретными фазовыми неоднородностями служат базовыми элементами для радиофотонных сенсорных систем, а сформированные неоднородности внутри волокна служат уникальным адресом датчика [7,8-10].

Основой построения оптоволоконных сенсорных сетей является чувствительный элемент, сформированный, как правило, из различного вида слоистых структур.

Комбинация двух интерферометрических структур в некоторых конфигурациях может способствовать повышению чувствительности измерений. Классическим примером

возникновения узкополосного резонанса с асимметричной формой в спектре является комбинация интерференции двух волновых процессов с близкими частотами [11]. Природа интерферирующих процессов может быть самой различной, поэтому такой резонанс носит универсальный характер и появляется в различных физических системах, ярко выраженный эффект проявляется, например, при интерференции света в комбинации кольцевого резонатора и волоконной брэгговской решетки [12,13]. Интерференция в комбинированных системах служит основой для высокоточных интерферометрических измерений [14].

В [15] предложен чувствительный элемент, разработанный на основе комбинированной структуры, объединяющей интерферометр Фабри – Перо в виде тонкой полимерной пленки на конце оптического волокна и сформированной за ней брэгговской решетки в оптическом волокне. Спектр модели комбинированного волоконно-оптического датчика, оцененный методом матрицы переноса, хорошо согласуется со спектром экспериментального образца. Сочетание двух резонансных волновых процессов в оптоволокне приводит к асимметричному резонансу типа Фано [15]. Спектральная форма резонанса зависит от параметров структуры, в частности, от диэлектрической и проницаемости составляющих сред, толщины резонатора Фабри – Перо, длины волоконной брэгговской решетки, ее наведенного показателя преломления и периода, а также от температуры и влажности. Спектр содержит узкую спектральную вырезку вблизи пика отражения волоконной брэгговской решетки. Авторы утверждают, что спектральная форма полученного ими резонанса имеет большее число степеней свободы, чем классический резонанс, при сохранении физики и природы полученного резонанса, поскольку оба они являются результатом суперпозиции двух близких резонансных систем (волоконной брэгговской решетки и Фабри-Перо). Полученный резонанс в [15] назван резонансом типа Фано.

Конфигурации чувствительных структур, обеспечивающих узкополосные спектральные составляющие, представляют особый интерес для использования в измерительных системах. Смещение длины волны узких вырезов при малейшем изменении конфигурации структуры может обеспечить измерения с высоким разрешением в узких диапазонах изменяющихся параметров [15]. Параметры сенсора включают: диэлектрическую и магнитную проницаемость всех трех сред (оптическое волокно, рабочее тело интерферометра и внешняя среда); период; наведенный показатель преломления и длину волоконной брэгговской решетки; а также длину интерферометра Фабри – Перо. При этом как минимум пять из этих параметров зависят от температуры, а два остальных также зависят от влажности. Малейшее изменение одного или нескольких из этих десяти параметров мгновенно изменит положение окна прозрачности. Следовательно, полученная конфигурация комбинированного сенсора является крайне перспективной для ее применения в высокоточных и высокочувствительных измерительных системах.

К недостаткам предложенного сенсора следует отнести большой размер чувствительного элемента по сравнению с объектом измерений.

Концепция построения комплексированного волоконно-оптического датчика для мониторинга солнечных батарей предложена в [16]. Основной отличительной особенностью, предложенной в работе, является комбинация интерферометра Фабри-Перо с адресной волоконной брэгговской структурой и осуществление контроля температуры по смещению центральной длины волны адресной структуры на основе радиофотонного анализа биений на адресной частоте. Там же предложен основной тренд развития комбинированных волоконно-оптических датчиков, основанный на применении последовательно сформированных на концевом участке оптического волокна волоконной брэгговской решетки, а на его срезе - резонатора Фабри–Перо. Раскрыты перспективы применения адресных волоконных брэгговских структур вместо классических брэгговских решеток с целью повышения метрологических характеристик. Показано, что конструкция комбинированного датчика и

системы в целом позволит измерять температуру окружающей среды в диапазоне $-60...+300$ °С, с погрешностью в $0,1-0,01$ °С [16].

К недостаткам предложенного сенсора также следует отнести большой размер чувствительного элемента по сравнению с объектом измерений, который может быть меньше по длине при использовании решения [патент].

Для решения задачи миниатюризации торца оптического волокна при участии автора [17] была предложена обещающая перспективы технология изготовления конических окончаний оптического волокна методом перетяжки. Принцип изготовления заключается в разогревании участка оптического волокна до температуры плавления кварца и плавном растяжении с образованием области перетяжки (талии). В качестве исходного элемента используется стандартное телекоммуникационное оптическое волокно, соответствующее рекомендации МСЭ-Т G.652. На участке оптического волокна удаляется защитно-упрочняющее покрытие и производится перетяжка до обеспечения требуемых размеров «талии» путем подбора величин тока и времени дуги. Для изготовленных образцов радиус микролинзы в среднем составлял порядка 15 мкм, что на порядок меньше диаметра оптического волокна.

1. Информационная структура измерительного преобразования биосенсоров на основе комбинированных оптических волоконных структур

Чувствительным элементом биосенсора является конструктивный элемент, воспринимающий воздействие измеряемой и других физических величин и осуществляющий преобразование этих воздействий в величину, удобную для последующей информационной обработки. Для того, чтобы понять механизм измерительного преобразования рассмотрим структуру комбинированного чувствительного элемента для измерения температуры клетки, external area (рис. 1).

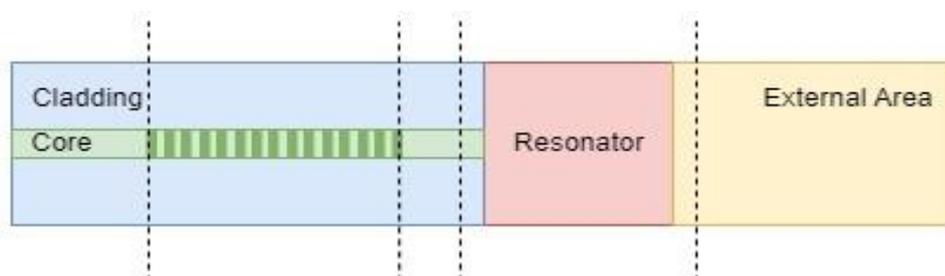


Рис. 1. Схема комбинированного чувствительного элемента, состоящего из волоконной брэгговской решетки и торцевого интерферометра Фабри-Перо

Несмотря на целевую постановку задачи, ее анализ требует понимания общей информационной структуры процесса измерительного преобразования.

Для формирования информационной структуры выпишем все величины, являющиеся входными параметрами математической модели. Для полной математической модели определяющими параметрами чувствительного элемента являются определяющие параметры волоконной брэгговской решетки и интерферометра Фабри-Перо.

Определяющими параметрами волоконной брэгговской решетки являются:

- показатель преломления сердцевины волокна n_0 ;
- наведенный показатель преломления Δn ;
- период решетки Λ ;

— геометрическая длина H , равная произведению длины периода Λ на количество периодов N , $\Lambda = N \lambda$, количество периодов N — величина постоянная.

Определяющими параметрами интерферометра Фабри – Перо, в терминах показателя преломления и геометрии области, являются:

- показатель преломления первого слоя n_1 ;
- показатель преломления второго слоя n_2 ;
- показатель преломления третьего слоя n_3 ;
- длина рабочей области интерферометра (длина второго слоя) h .

Пусть на каждый элемент комбинированной структуры, осуществляется одновременное внешнее физическое воздействие двумя различными физическими полями F_1 и F_2 . В общем случае, каждый из определяющих параметров чувствительного элемента зависит от величины внешнего физического воздействия. То есть, справедливо запишем:

$$p_k = \Psi_k(F_1, F_2, \mathbf{C}_k), \quad \mathbf{p} = \{n_0, \Delta n, \Lambda, n_1, n_2, n_3, h\},$$

где \mathbf{p} — вектор параметров системы, k — индекс параметра, выбираемого из множества параметров системы, Ψ_k — некая функциональная зависимость k -го параметра чувствительного элемента от полей физического воздействия F_1 и F_2 , а \mathbf{C}_k — вектор коэффициентов (рис. 2).

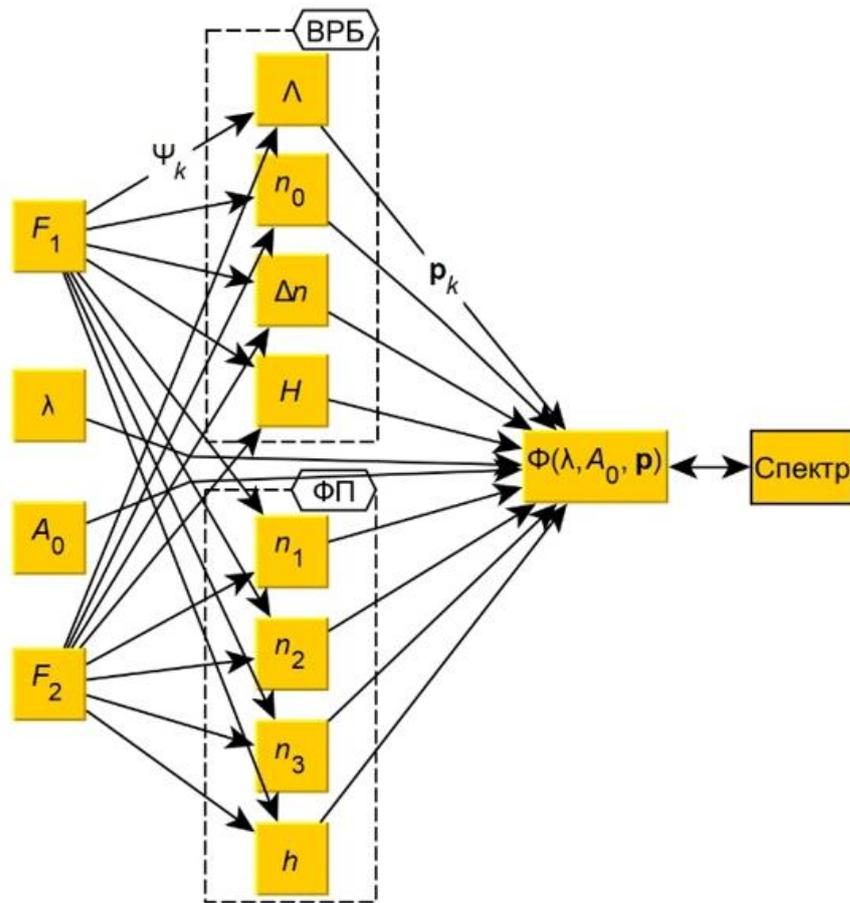


Рис. 2. Обобщенная информационная структура комбинированного элемента

Помимо прочего, существует функциональная зависимость $\Phi(\lambda, A_0, \mathbf{p})$, преобразующая поданное когерентное излучение на длине волны λ с амплитудой A_0 в излучение на этой же длине волны, но с амплитудой A , при этом считаем, что в рамках данного измерительного преобразования не происходит переизлучения на других длинах волн. Информационная структурная схема такой зависимости похожа на полностью связную нейронную сеть.

Общая информационная структура измерительного преобразования в общем случае выглядит таким образом, что все параметры системы зависят от всех внешних физических воздействий через зависимости Ψ_k , а выходной параметр через общую функциональную зависимость $\Phi(\lambda, A_0, \mathbf{p})$. Отдельный интерес представляют информационные структуры измерительного преобразования для частных случаев наложений физических полей. Рассмотрим некоторые частные случаи информационных структур измерительного преобразования, когда определены виды физического воздействия и участки воздействия чувствительного элемента.

1.1. Информационная структура температурного и деформационного воздействия

Рассмотрим информационную структуру измерительного преобразования в том случае, если комбинированный сенсор испытывает одновременно температурное и деформационное воздействие (рис. 3).

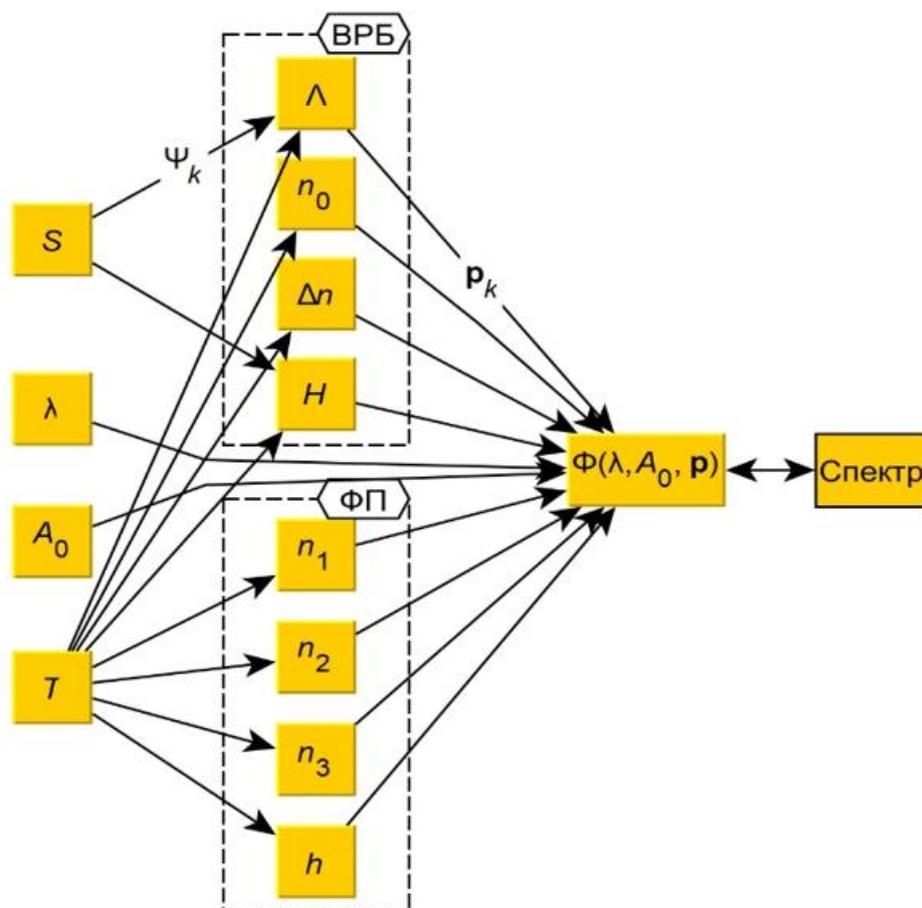


Рис. 3. Информационная структура температурного и деформационного воздействия

При этом, деформационное воздействие оказывается только на волоконную брэгговскую решетку, а температурное воздействие одинаково на оба элемента, тогда зависимость параметров от приложенного внешнего воздействия примет вид:

$$\begin{aligned} n_0 &= (1 + \Delta T \cdot c_{FC_TO}) \cdot n_{0*}, & n_1 &= (1 + \Delta T \cdot c_{1_TO}) \cdot n_{1*}, \\ \Delta n &= (1 + \Delta T \cdot c_{FC_TO}) \cdot \Delta n_*, & n_2 &= (1 + \Delta T \cdot c_{2_TO}) \cdot n_{2*}, \\ \Lambda &= (1 + \Delta T \cdot c_{FC_TE}) \cdot (1 + \Delta F \cdot \kappa) \cdot \Lambda_*, & n_3 &= (1 + \Delta T \cdot c_{3_TO}) \cdot n_{3*}, \\ & & h &= (1 + \Delta T \cdot c_{2_TE}) \cdot h_*, \end{aligned}$$

где величины со «звездочкой» определяют значения параметров без внешнего воздействия, показатель преломления сердцевины оптического волокна n_0 и наведенный показатель преломления Δn зависят только от величины приложенной температуры ΔT через термооптический коэффициент сердцевины волокна c_{FC_TO} , период волоконной брэгговской решетки Λ изменяет свою длину под воздействием одновременно температуры и деформации, через коэффициенты термоупругости c_{FC_TE} и линейной упругости κ (жесткости), показатели преломления трех слоев интерферометра Фабри – Перо n_i зависят только от температуры и соответствующего им термооптического коэффициента c_{i_TO} , длина h рабочей области интерферометра тоже зависит только от температуры и соответствующего слою коэффициента термоупругости c_{2_TE} .

1.2. Информационная структура температурного и химико-биологического воздействия

Рассмотрим информационную структуру измерительного преобразования в том случае, если комбинированный сенсор испытывает одновременно температурное и химическое/биологическое воздействие. При этом, воздействие температуры и на волоконную брэгговскую решетку и на интерферометр Фабри-Перо, а химико-биологическое воздействие оказывается только на чувствительный элемент этой системы — на рабочую область интерферометра, которую в этом случае делают из материала, показатель преломления которого линейно и обратимо меняется от изменения концентрации измеряемого вещества в окружающей среде (считаем интерферометр внешним или внутренним открытого типа):

$$\begin{aligned} n_0 &= (1 + \Delta T \cdot c_{FC_TO}) \cdot n_{0*}, & n_1 &= (1 + \Delta T \cdot c_{1_TO}) \cdot n_{1*}, \\ \Delta n &= (1 + \Delta T \cdot c_{FC_TO}) \cdot \Delta n_*, & n_2 &= (1 + \Delta T \cdot c_{2_TO}) \cdot (1 + \Delta v \cdot c_v) \cdot n_{2*}, \\ \Lambda &= (1 + \Delta T \cdot c_{FC_TE}) \cdot \Lambda_*, & n_3 &= (1 + \Delta T \cdot c_{3_TO}) \cdot n_{3*}, \\ & & h &= (1 + \Delta T \cdot c_{2_TE}) \cdot h_*, \end{aligned}$$

где величины со «звездочкой» также определяют значения параметров без внешнего воздействия, показатель преломления сердцевины оптического волокна n_0 и наведенный показатель преломления Δn зависят только от величины приложенной температуры ΔT через термооптический коэффициент сердцевины волокна c_{FC_TO} , период волоконной брэгговской решетки Λ изменяет свою длину под воздействием температуры, через коэффициент термоупругости c_{FC_TE} , показатели преломления первого и третьего слоев интерферометра Фабри – Перо n_i зависят только от температуры и соответствующего им термооптического

коэффициента c_{i_TO} , длина h рабочей области интерферометра тоже зависит только от температуры и соответствующего слою коэффициента термоупругости c_{2_TE} , а показатель преломления рабочей области интерферометра n_2 зависит одновременно и от температуры через соответствующий термооптический коэффициент $c_{2_ТОИ}$ от концентрации вещества ν в окружающей среде через коэффициент линейной зависимости c_ν . Общая информационная структура температурного и химического-биологического воздействия приведена на рис. 4.

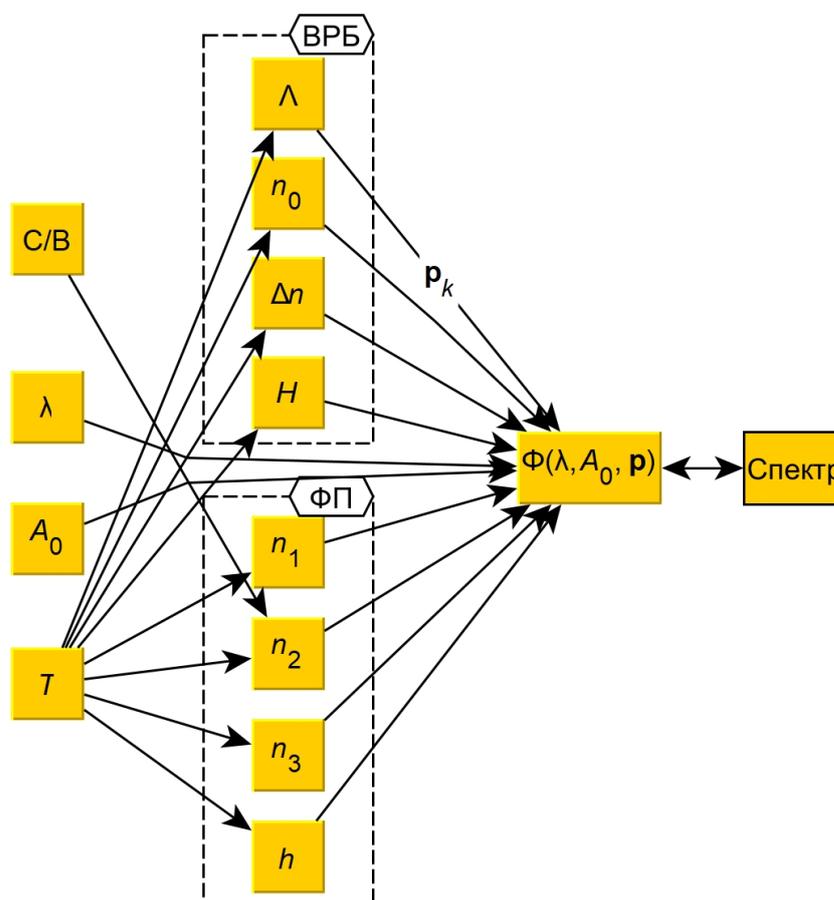


Рис. 4. Информационная структура температурного и химико-биологического воздействия

Информационная структура измерительного преобразования расширяет понимание результата внешнего воздействия комбинированного чувствительного элемента и одновременно с этим служит основой для алгоритмизации процесса моделирования в каждом конкретном случае. Например, обе информационные структуры как температурного и деформационного, так и температурного и химико-биологического воздействия показывают, что температура влияет на все параметры измерительной системы и учет температуры является крайне важным фактором измерительного преобразования.

2. Оценка чувствительности и погрешностей измерительного преобразования

Для оценки чувствительности погрешности измерительного преобразования, осуществляемого комбинированным сенсором, предварительно проведем такие же оценки его отдельных элементов.

2.1. Чувствительность и оценка погрешностей биосенсора на основе интерферометра Фабри-Перо

Предположим, что все три слоя интерферометра являются диэлектриками ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$), и сделав замену $n^2 = \epsilon\mu = \epsilon$, оставим для оценки только коэффициент отражения от первой границы.

Поставим задачу так: зная с какой-либо погрешностью ϵ_r коэффициент отражения r_1 на заданной длине волны λ , при температуре T , и зная все остальные параметры системы, определить теоретически достижимую погрешность ϵ_n показателя преломления чувствительного слоя n_2 .

Получим решение в терминах показателя преломления и длины волны, в условиях сделанных предположений и исключим из него явную зависимость параметров от температуры, и получим уравнение, связывающее параметры интерферометра с коэффициентом отражения:

$$r_1 + \epsilon_r = \frac{\left| \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (n_2 + \epsilon_n) h + \frac{j}{2} \ln \left(\frac{-n_1 n_3 + (n_1 - n_3)(n_2 + \epsilon_n) + (n_2 + \epsilon_n)^2}{+n_1 n_3 + (n_1 - n_3)(n_2 + \epsilon_n) + (n_2 + \epsilon_n)^2} \right) \right) \right|^2}{\left| \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} (n_2 + \epsilon_n) h + \frac{j}{2} \ln \left(\frac{-n_1 n_3 + (n_1 + n_3)(n_2 + \epsilon_n) - (n_2 + \epsilon_n)^2}{+n_1 n_3 + (n_1 + n_3)(n_2 + \epsilon_n) + (n_2 + \epsilon_n)^2} \right) \right) \right|^2}. \quad (1)$$

Уравнение (1) предназначено для того, чтобы оценить погрешность ϵ_n определения показателя преломления n_2 рабочей зоны слоя интерферометра от погрешности определения ϵ_r коэффициента отражения r_1 . Существенно нелинейное уравнение (1) может быть решено только численно, более того, учитывая квазипериодический характер нелинейности и общий вид зависимости коэффициента отражения от длины волны, для каждого значения r_1 существует бесконечное множество значений n_2 .

Оценку погрешности определения показателя преломления можно вести только численно, и только вблизи искомым значений. Зададим промежуточные значения используемых физических величин, чтобы провести оценку погрешностей измерения.

Итак, длина волны λ находится в диапазоне 1510–1590 нм, для проведения оценок примем его равным 1550 нм; показатель преломления сердцевины оптического волокна, например для серийно выпускаемого волокна Corning SMF-28 на длине волны 1550 нм равен $n_1 = 1.4682$, это значение и примем для проведения оценок.

Показатель преломления рабочей области интерферометра n_2 может находиться в достаточно широком диапазоне величин, начиная от значений, достаточно близких к показателю преломления волокна, заканчивая значениями показателя преломления полимерных веществ или даже алмаза, который может достигать значений до 2.42.

Типичный показатель преломления различных стекол находится в широком диапазоне значений, от 1.4 до 2.2. С учетом сказанного, величину показателя преломления рабочей области интерферометра для проведения оценок примем равной $n_2 = 1.6$.

Третий слой интерферометра может быть участком внешнего или внутреннего интерферометра. В случае внешнего интерферометра показателем преломления будет показатель преломления внешней среды (клетка), в случае внутреннего как открытого, так и закрытого интерферометра третья среда — это оптическое волокно. Если интерферометр открытый, то он обеспечивает большую площадь контакта вещества во внешней среде с рабочей зоной, внешней средой, как правило является или газ (воздух $n = \sim 1$) или жидкость,

что более часто при биологическом контроле, (кровь $n \approx 1.34$, плазма $n \approx 1.31$, вода $n \approx 1.4$). Не потеряв общность рассуждений и справедливость выполняемых оценок, примем величину показателя преломления внешней области интерферометра равной $n_3 = 1.34$.

Коэффициент отражения, как правило лежит в диапазоне значений от нуля до единицы, но учитывая малую разницу в показателях преломления слоев интерферометра, реально достижимые максимальные значения находятся в интервале от 0 до 0.5. Коэффициент отражения оптимально принять равным $r_1 = 0.25$. Длина рабочей зоны интерферометра h , как правило, имеет значение от нескольких микрон до нескольких десятков микрон или даже сотен микрон.

Общая теория интерферометров гласит, что свободный спектральный диапазон уменьшается с увеличением длины рабочей зоны интерферометра h , что как правило, ведет к повышению чувствительности интерферометра. Для оценок примем $h = 50 \times 10^{-6}$ м.

Выполненные оценки величин в уравнении (1) все еще не позволяют получить аналитическую оценку погрешностей. Выполним такую оценку численно, построив зависимость погрешности вычисления показателя преломления от величины погрешности измерения коэффициента отражения. Для чего, используем оценочные значения величин параметров интерферометра и для каждого значения погрешности определения коэффициента отражения найдем соответствующее значение погрешности показателя преломления. На рис. 5 приведен спектр отражения интерферометра Фабри-Перо, полученный при показателях преломления $n_1 = 1.4682$, $n_2 = 1.6$, $n_3 = 1.34$, длине рабочей области интерферометра $h = 50$ мкм в диапазоне длин волн от $\lambda_{\text{Min}} = 1510$ нм до $\lambda_{\text{Max}} = 1590$ нм.

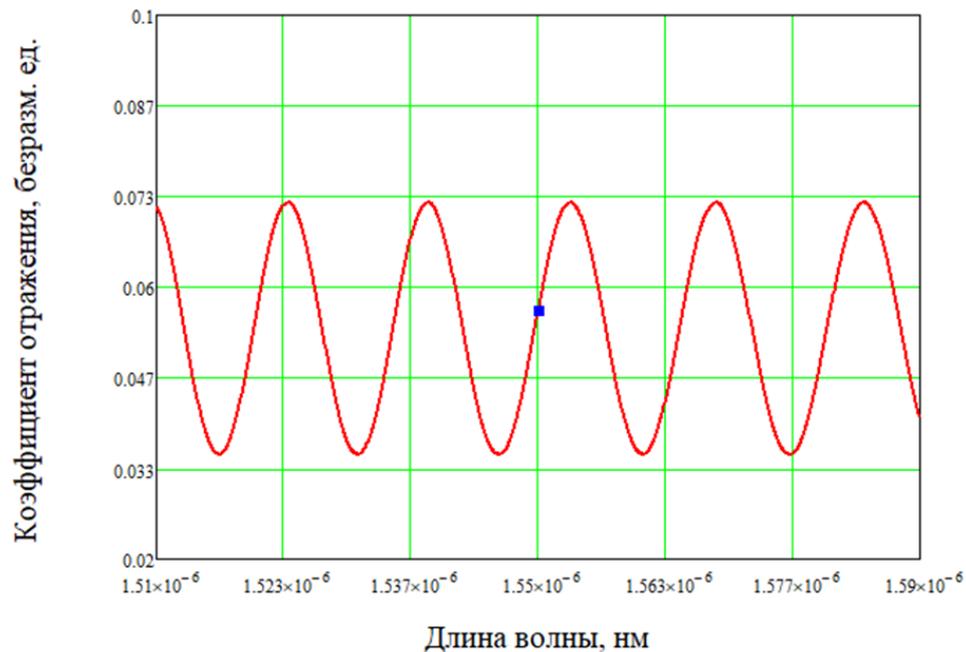


Рис. 5. Спектр отражения интерферометра Фабри-Перо, полученный при показателях преломления $n_1 = 1.4682$, $n_2 = 1.6$, $n_3 = 1.34$, длине рабочей области интерферометра $h = 50$ мкм в диапазоне длин волн от $\lambda_{\text{Min}} = 1510$ нм до $\lambda_{\text{Max}} = 1590$ нм; синей точкой на графике отмечено значение коэффициента отражения $r_1 = 0.056$ при длине волны $\lambda = 1550$ нм

Реперное значение коэффициента отражения на длине волны $\lambda = 1550$ нм равно 0.056. Максимальное значение абсолютной погрешности определения величины коэффициента отражения примем равным 1.5×10^{-4} , а относительной - равной 2% от измеряемой

величины, и оценим величину, получаемой относительной ошибки определения показателя преломления.

На рис. 6 приведена зависимость абсолютной (красная линия) и относительной (синяя линия) ошибки определения коэффициента отражения в зависимости от относительной ошибки определения показателя преломления.

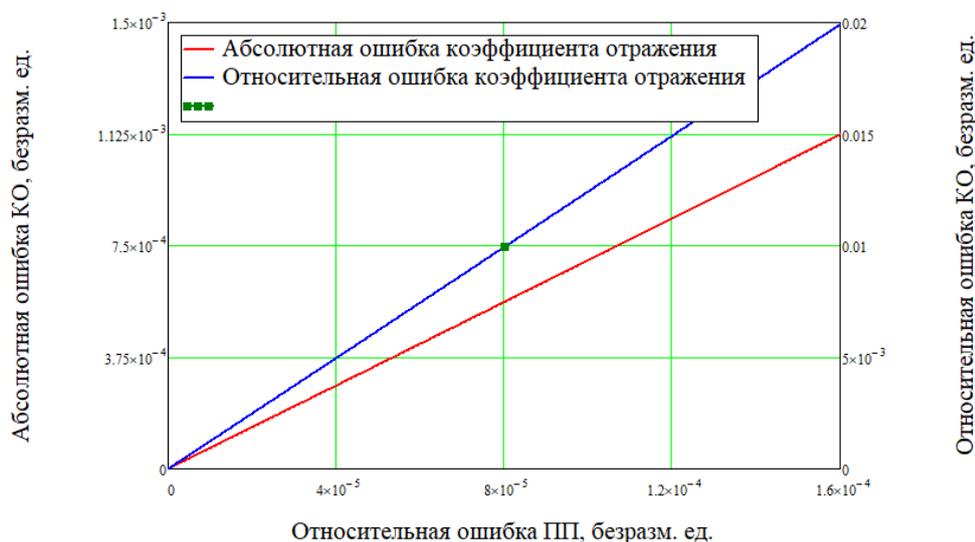


Рис. 6. Зависимость абсолютной (красная линия) и относительной (синяя линия) ошибки определения коэффициента отражения в зависимости от относительной ошибки определения показателя преломления на длине волны $\lambda = 1550$ нм

На большом интервале эта зависимость ожидаемо имеет квазипериодический характер и при увеличении относительной ошибки определения показателя преломления влечет за собой экспоненциальный рост максимальных значений погрешности определения коэффициента отражения.

Если же максимальная относительная погрешность определения коэффициента отражения не превышает 2% (синий график, правая ось, рис. 6), тогда при этом максимальная абсолютная ошибка определения коэффициента отражения не должна превышать 1.5×10^{-4} при определяемом значении 0.056 (красная линия, левая ось, рис. 6). Если потребовать, чтобы относительная ошибка определения коэффициента отражения не превышала 1% (0.01, зеленая точка по правой оси, рис. 6), тогда относительная ошибка определения показателя преломления не превысит 8×10^{-5} , что обеспечит достижимую точность определения показателя преломления в пятом знаке после запятой.

Чувствительность смещения спектра отражения интерферометра Фабри-Перо к деформации может достигать 6.0 пм/мкэ, а по температуре до 1.1 пм/°C [18,19] и даже 237.5 пм/°C [20] в зависимости от выбранного материала, формирующего рабочую область интерферометра.

2.2. Оценка чувствительности и оценка погрешностей биосенсора на основе волоконной брэгговской решетки

Волоконная брэгговская решетка является очень популярным элементом для формирования точечных и квазираспределенных волоконно-оптических сенсорных систем. Исследованию характеристик и свойств волоконных брэгговских решеток посвящены сотни

тысяч работ ученых по всему миру [21]. Границы применимости и чувствительность волоконных брэгговских решеток исследованы в огромном количестве работ как учеными по всему миру [22-25], так и представителями казанской научной школы [26,27], к которой принадлежат авторы. Чувствительность волоконной брэгговской решетки, сформированной в сердцевине телекоммуникационного оптического волокна хорошо известна и исследована, она составляет ~ 11 пм/°С [28].

Пример спектров отражения волоконной брэгговской решетки, с центральной длиной волны $\lambda_{Br} = 1550.0$ нм, в оптическом волокне с показателем преломления $n = 1.4682$, наведенным показателем преломления $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$, и периодом $\Lambda = 5.2776 \times 10^{-7}$ м без аподизации и с параметром аподизации $p = 1/8$ приведены на рис. 7.

Аподизация волоконной брэгговской решетки приводит к тому, что снижается амплитуда боковых (в стороны от центральной длины волны) лепестков в спектре отражения и изменяется эффективный показатель преломления участка оптического волокна с нанесенной решёткой. В результате этого происходит смещение центральной длины волны в спектре отражения. Кроме того, как это можно заметить на рис. 7 (синяя линия), аподизированный спектр волоконной брэгговской решетки теряет свою симметрию относительно центральной длины волны.

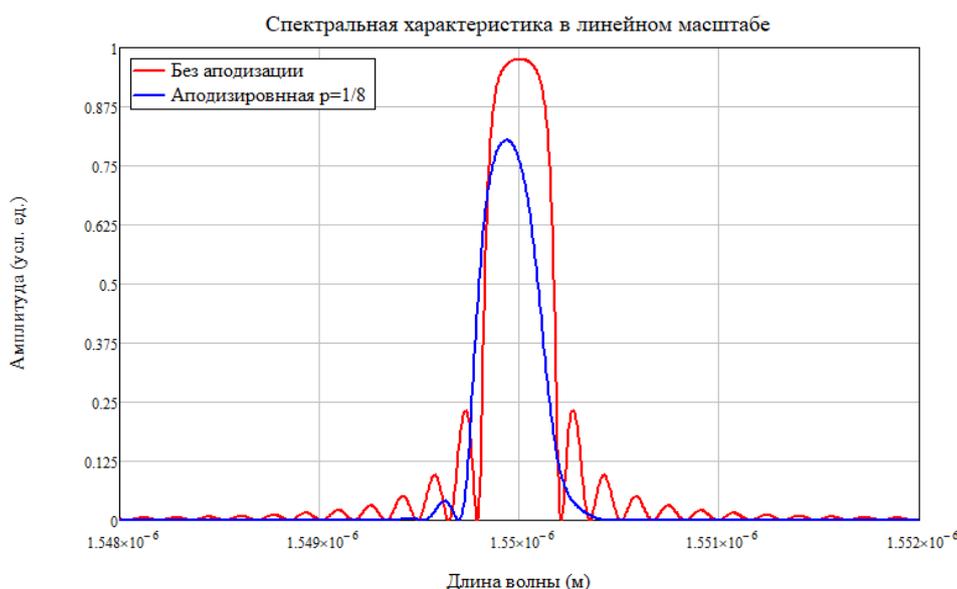


Рис. 7. Спектр отражения волоконной брэгговской решетки с центральной длиной волны $\lambda_{Br} = 1550.0$ нм в оптическом волокне с показателем преломления $n = 1.4682$, наведенным показателем преломления $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ и периодом $\Lambda = 5.2776 \times 10^{-7}$ м: без аподизации (красная линия) и с параметром аподизации $p = 1/8$ (синяя линия)

Уменьшение наведенного показателя преломления влечет за собой снижение максимального коэффициента отражения, одновременно с этим спектр отражения становится симметричен, на рис. 8 приведен спектр отражения волоконной брэгговской решетки с теми же параметрами, что и на рис. 7, но при наведенном показателе преломления в 10 раз меньшем.

Для волоконной брэгговской решетки нет необходимости строить зависимость ошибки определения центральной длины волны в зависимости от ошибки определения амплитуд. Метод определения центральной длины волны волоконных брэгговских решеток хорошо проработан в казанской научной школе [29-31], показано, что реально достижимая точность определения центральной длины волны составляет 0.1 пм, что позволяет обеспечить определение, например, температуры с точностью до 0.01 °С.

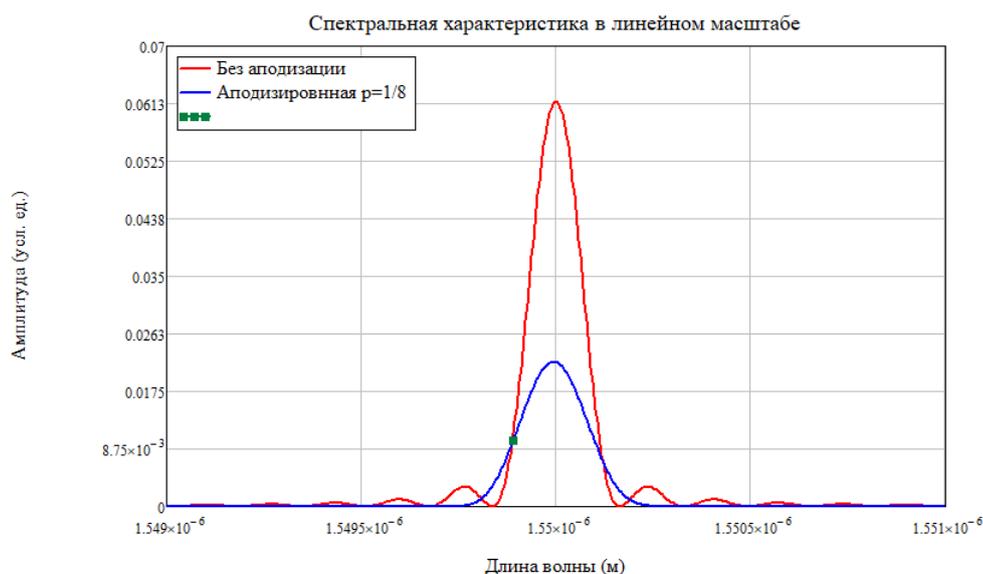


Рис. 8. Спектр отражения волоконной брэгговской решетки с наведенным показателем преломления $\Delta n = 5 \times 10^{-5}$, без аподизации (красная линия) и с параметром аподизации $p = 1/8$ (синяя линия)

Вместе с тем, чувствительность смещения спектра отражения волоконной брэгговской решетки от температуры может достигать до $84.6 \text{ пм}/^\circ\text{C}$, [32] в зависимости от температурной чувствительности оптического волокна в котором решетка сформирована.

2.3. Оценка чувствительности и погрешностей измерительного преобразования биосенсора на основе комбинированной структуры

Аналитическая оценка чувствительности (величины смещения спектрального отклика в зависимости от величины физического воздействия) комбинированной структуры крайне затруднительна в силу значительной нелинейности зависимости спектра отражения от параметров системы. Вместе с тем, при оценке чувствительности комбинированной структуры можно опираться на количественные оценки, выполняемые численно как для отдельных элементов, так и для структуры в целом, на количественные оценки, полученные экспериментально как самостоятельно, так и другими исследователями [6].

Количественные оценки проведем на основе модели спектра отражения, полученного методом матриц передачи. Спектральная характеристика комбинированной (Фабри-Перо и волоконная брэгговская решетка) структуры с параметрами, приведенными в предыдущих параграфах для интерферометра Фабри – Перо [33]: показатели преломления $n_1 = 1.4682$, $n_2 = 1.6$, $n_3 = 1.34$, длина рабочей области интерферометра $h = 50 \text{ мкм}$, для волоконной брэгговской решетки: центральная длина волны $\lambda_{\text{Br}} = 1550.0 \text{ нм}$, в оптическом волокне с показателем преломления $n = 1.4682$, наведенным показателем преломления $\Delta n = 5 \times 10^{-5}$ и периодом $\Lambda = 5.2776 \times 10^{-7} \text{ м}$ без аподизации (красная линия) и с параметром аподизации $p = 1/8$ (синяя линия), в диапазоне длин волн 1549–1551 нм приведен на рис. 9, на вкладке – спектр в диапазоне длин волн 1510–1590 нм.

Ситуационное взаимное расположение спектров отражения комбинированной структуры, полученное с разницей температуры в $1 \text{ }^\circ\text{C}$, по математической модели с привлечением математического аппарата матриц передачи и применением алгоритма, представленного на рис. 4, приведены на рис. 10.



Рис. 9. Спектр отражения комбинированной структуры с волоконной брэгговской решеткой ($\lambda_{Br} = 1550.0$ нм, в оптическом волокне с показателем преломления $n = 1.4682$, наведенным показателем преломления $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$, периодом $\Lambda = 5.2776 \times 10^{-7}$ м) без аподизации (красная линия) и с параметром аподизации $p = 1/8$ (синяя линия) диапазоне длин волн 1549–1551 нм и интерферометра Фабри-Перо (показатели преломления $n_1 = 1.4682$, $n_2 = 1.6$, $n_3 = 1.34$, длина $h = 50$ мкм)



Рис. 10. Спектр отражения комбинированной структуры при температурном воздействии ($T = 20$ °С — красная, $T = 21$ °С — синяя линии)

Численные исследования смещения спектра комбинированной структуры при различных параметрах системы показали, что при изменении показателя преломления сердцевины оптического волокна в диапазоне 1.4–1.5 и показателя преломления рабочей области интерферометра Фабри – Перо в диапазоне 1.0–2.2, реально достижимые параметры чувствительности комбинированной структуры составляют от 1.1 пм/°С [18,19] (при стандартных 11 пм/°С [34]) до легко реализуемых на практике 44.2 пм/°С (боросиликатное стекло)[35], а при использовании специально подготовленных материалов, может достигать до 237.5 пм/°С[20].

Заключение

Выведены и определены требования и условия работы биосенсорного устройства и определены технические требования к чувствительному элементу и измерительной системе в следующей конфигурации: рабочая длина волны измеряющего излучения находится в диапазоне третьего окна прозрачности кварцевого волокна, а именно 1510–1590 нм; чувствительный элемент измерительной системы формируется на базе классического телекоммуникационного волокна типа SMF-28 или его аналогов; центральная рабочая температура может быть произвольно выбрана в интервале от -80 до 100 °С, при этом рабочий диапазон температуры ΔT не превышает 10 °С; допустимая погрешность определения спектрального смещения не более 0.05 пм, при чувствительности не менее 0.05 пм на минимальную единицу воздействия.

Сформулирована информационная структура измерительного преобразования, действующего в чувствительном элементе биосенсорного устройства. Выявлены условия и границы ее применения.

На основе математической модели проведена численная оценка чувствительности чувствительного элемента и дана оценка погрешностей. Показано, что при изменении показателя преломления сердцевины оптического волокна в диапазоне 1.4 – 1.5 и показателя преломления рабочей области интерферометра Фабри-Перо в диапазоне 1.0 – 2.2 , реально достижимые параметры чувствительности комбинированной структуры по температуре составляют от стандартных 11 пм/°С до легко реализуемых на практике 44.2 пм/°С, а при использовании специальных материалов, может достигать до 237.5 пм/°С.

При этом обеспечивается определение температуры с погрешностью до 0.01 °С при замене волоконных брэгговских решеток на адресные волоконные брэгговские структуры при методе их компактной записи и применение решений по миниатюризации концевой структуры биосенсора.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Chen P. Cascaded-Cavity Fabry-Perot Interferometric Gas Pressure Sensor based on Vernier Effect / P. Chen et al. // *Sensors*. - 2018. - Vol. 18, № 11. - P. 3677.
2. Ma W. CO₂ Gas Sensing Using Optical Fiber Fabry-Perot Interferometer Based on Polyethyleneimine/Poly(Vinyl Alcohol) Coating / Ma W. et al. // *IEEE Photonics J.* - 2017. - Vol. 9, № 3. - P. 1–8.
3. Shivananju B.N. CO₂ sensing at room temperature using carbon nanotubes coated core fiber Bragg grating / B.N. Shivananju et al. // *Review of Scientific Instruments*. American Institute of Physics, 2013. - Vol. 84, № 6. - P. 065002.
4. Kazanskiy N.L. Carbon Dioxide Gas Sensor Based on Polyhexamethylene Biguanide Polymer Deposited on Silicon Nano-Cylinders Metasurface / N.L. Kazanskiy, M.A. Butt, S.N. Khonina // *Sensors*, MDPI. - 2021. - Vol. 21, № 2. - P. 378.
5. Jáuregui-Vázquez D. An All Fiber Intrinsic Fabry-Perot Interferometer Based on an Air-Microcavity / D. Jáuregui-Vázquez et al. // *Sensors*. - 2013. - Vol. 13, № 5. - P. 6355–6364.
6. Каид М.Р.Т.М. Интегрированный волоконно-оптический датчик Фабри-Перо и волоконной Брэгговской решетки для улучшенного измерения температуры / М.Р.Т.М. Каид и др. // *Сборник статей II Международной научно-практической конференции «Инновации в науке: вызовы и перспективы будущего»*. Россия, Саратов: НОП «Цифровая наука», 2024. - P. 38–45.

7. Morozov O.G. Addressed fiber bragg structures in quasi-distributed microwave-photonic sensor systems / O.G. Morozov, A.J. Sakhabutdinov // *Comput. Opt. Institution of Russian Academy of Sciences*, 2019. - Vol. 43, № 4. - P. 535–543.
8. Morozov O. Addressed Combined Fiber-Optic Sensors as Key Element of Multisensor Greenhouse Gas Monitoring Systems / O. Morozov et al. // *Sensors*. - 2022. - Vol. 22, № 13. - P. 4827.
9. Morozov O. Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems/ O. Morozov et al. // *Sensors*. - 2020. - Vol. 20, № 9. - P. 2693.
10. Каид М.Р.Т.М. Радиофотонные сенсорные системы на основе интерферометра Фабри-Перо и адресных волоконных Брэгговских структур для улучшенного измерения температуры / М.Р.Т.М. Каид et al. // Сборник статей II Международной научно-практической конференции «Инновации в науке: вызовы и перспективы будущего». - Саратов: НОП «Цифровая наука», 2024. - P. 52–58.
11. Трибельский М.И. Резонансы Фано в квантовой и классической механике: учебное пособие. - Москва: МГТУ МИРЭА, 2012. – 38 с.
12. Campanella C.E. Mode-splitting cloning in birefringent fiber Bragg grating ring resonators /C.E. Campanella et al. // *Opt. Lett.* - 2016. -Vol. 41, № 12. - P. 2672–2675.
13. Campanella C.E. Localized strain sensing with fiber Bragg-grating ring cavities / C.E. Campanella et al. // *Opt. Express*. -2013. - Vol. 21, № 24. - P. 29435–29441.
14. Аглиуллин Т.А. Единая унифицированная платформа волоконно-оптических измерительных систем на основе комбинированных резонансных структур / Т.А. Аглиуллин и др. // VI Научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ТТТ-2023. - Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2023. - Vol. 2. - P. 7–13.
15. Sakhabutdinov A.Zh. Fano-type resonance structures based on combination of fiber Bragg grating with Fabry-Perot interferometer /A.Zh. Sakhabutdinov et al. // *Karbala International Journal of Modern Science*. - 2023. - Vol. 9, № 1.
16. Ходжанепесов К.А. Концепция построения комплексированного волоконно-оптического датчика для мониторинга солнечных батарей / К.А. Ходжанепесов и др. // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. - 2023. - Vol. 3, № 2. - P. 55–67.
17. Qaid M.R.T.M. et al. A Comparative Study of Tapering Methods and Transfer Characteristics in Fabry-Perot Interferometric Applications / M.R.T.M. Qaid et al. // *Proceedings of the 2024 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GE-COST)*. Miri Sarawak, Malaysia: IEEE, 2024. - P. 1–4.
18. Liu S. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer / S. Liu et al. // *Opt. Lett.* - 2014. - Vol. 39, № 7. - P. 2121.
19. Li Z. High-Sensitivity Gas Pressure Fabry–Perot Fiber Probe With Micro-Channel Based on Vernier Effect / Z. Li et al. // *J. Lightwave Technol* - 2019. - Vol. 37, № 14. - P. 3444–3451.
20. Ruan J. High-sensitivity temperature sensor based on long-period fiber grating / J. Ruan et al. // *Optoelectron. Lett.* - 2008. - Vol. 4, № 2. - P. 114–116.
21. Makarov R. Enhancing Microwave Photonic Interrogation Accuracy for Fiber-Optic Temperature Sensors via Artificial Neural Network Integration / R. Makarov et al. // *Optics*. - 2024. - Vol. 5, № 2. - P. 223–237.
22. Hegde G., Asokan S., Hegde G. Fiber Bragg grating sensors for aerospace applications: a review // *ISSS J Micro Smart Syst.* - 2022. - Vol. 11, № 1. - P. 257–275.
23. Tosi D. Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors // *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. - Vol. 17, № 10. - P. 2368.
24. Kou J.-L. Microfiber-Based Bragg Gratings for Sensing Applications: A Review / Kou J.-L. et al.// *Sensors (Basel)*. - 2012. - Vol. 12, № 7. - P. 8861–8876.
25. Othonos A. Fiber Bragg gratings // *Review of Scientific Instruments*. American Institute of Physics, 1997. - Vol. 68, № 12. - P. 4309–4341.

26. Morozov O.G. Fiber-optic sensor of thermal field distribution in work chambers of microwave process installations / O.G. Morozov // 12th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2002). - 2002. - P. 569–570.
27. Morozov O.G. Fiber-optic Bragg sensors with special spectrum shapes for climatic test systems/ O.G. Morozov et al. // Proceedings Volume Optical Technologies for Telecommunications 2016, 1034217 (2017). - 2017. - Vol. 10342. <https://doi.org/10.1117/12.2270750>.
28. Васильев С.А. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев и др. // Квантовая электроника. - 2005. - Т. 35, № 12. - С. 1085–1103.
29. Anfinogentov V. Algorithm of FBG Spectrum Distortion Correction for Optical Spectra Analyzers with CCD Elements / V. Anfinogentov et al. // Sensors. - 2021. - Vol. 21, № 8. - P. 2817.
30. Sakhabutdinov A.Zh. Clarification of the central wavelength FBG position in a poor signal-to-noise ratio conditions (in Russian) / A.Zh. Sakhabutdinov, I.I. Nureev, O.G. Morozov // Physics of Wave Processes and Radio Systems. - 2015. - Vol. 18, № 3–2. - P. 98–102.
31. Morozov O.G. Fitting the central wave length of fiber bragg gratings in the conditions of small resolution ability of the optical spectrum analyzer and fluctuating level of optical signal power / O.G. Morozov et al. // Vestnik NTsBZhD. - 2020. - Vol. 2, № 44. - P. 150–166.
32. Liu G. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity / G. Liu, M. Han, W. Hou // Opt. Express. - 2015. - Vol. 23, № 6. - P. 7237–7247.
33. Валеев Б.И. et al. Высокочувствительный оптоволоконный микрофон на основе интерферометра Фабри-Перо, сформированного внутри открытой полости на торце оптического волокна / Б.И. Валеев и др. // Сборник трудов международной научной конференции (Школа молодых ученых), посвященной сотрудничеству с союзными государствами. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. - P. 127–130.
34. Othonos A. Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing. Illustrated edition / A. Othonos, K. Kalli // Boston, Mass: Artech House Print on Demand, 1999. - 433 p.
35. Аглиуллин Т.А. Волоконно-оптический датчик температуры на основе стеклянного интерферометра Фабри – Перо / Т.А. Аглиуллин и др. // Прикладная фотоника. 2023. Vol. 10, № 5. - P. 58–74.

INFORMATION STRUCTURE, SENSITIVITY AND ERRORS OF MEASUREMENT TRANSFORMATION OF BIOSENSORS BASED ON COMBINED OPTICAL FIBER STRUCTURES

M.R.T.M. Qaid, B.I. Valeev, T.A. Agliullin

Kazan National Research Technical University after named A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. To date, no simple methods have been proposed that would allow reliable local monitoring of the dynamics of a living cell, reflecting both its time course and the intensity of its various metabolic, electrophysiological and morphological processes in norm and pathology. The article considers the problem of analyzing the information structure, sensitivity and errors of fiber-optic systems for monitoring the parameters of microscopic biological objects, due to the transition to the use of fiber-optic biosensors based on combined optical fiber structures, the interrogation of which is carried out by radiophotonic methods. Using the example of measuring the temperature of a living cell, it is shown that when changing the refractive index of the optical fiber core in the range of 1.4–1.5 and the refractive index of the working region of the Fabry-Perot interferometer in the range of 1.0–2.2, the actually

achievable sensitivity of the combined structure ranges from the standard 11 pm/°C to 44.2 pm/°C, which is easily implemented in practice, and when using special materials it can reach 237.5 pm/°C. At the same time, temperature is determined with an error of up to 0.01 °C.

Keywords: biosensor, fiber Bragg grating, Fabry-Perot interferometer, combined optical fiber structure, microwave photonic sensor technologies, multiparameter impact, measuring transformation, temperature, deformation, biological impact, information structure, sensitivity, error.

Статья представлена в редакцию 20 мая 2025 г.