

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ДАТЧИКА ФАБРИ-ПЕРО ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

*А.Ж. Сахабутдинов¹, В.А. Анфиногентов¹, О.Г. Морозов¹, Ю.А. Тунакова¹,
М.П. Данилаев¹, И.И. Нуреев¹, А.А. Кузнецов¹, К.А. Липатников¹,
А.Р. Шагидуллин², К.Г. Каримов¹, С.М.Р.Х. Хуссейн³, Б.И. Валеев¹*

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

²Институт проблем экологии и недропользования Академии Наук Республики Татарстан
Российская федерация, 420087, г. Казань, ул. Даурская, д.28

³Университет Кербелы, 56001, Кербела, Ирак

Аннотация. В работе представлена математическая модель оптоволоконного датчика Фабри-Перо, реализованного на торце оптического волокна путем нанесения тонкой полимерной пленки с чувствительностью к концентрации парниковых газов. Проведена верификация математической модели с результатами натурных экспериментов и данными других авторов с целью использования ее в качестве цифрового двойника чувствительного элемента датчика. Проведенные численные и натурные эксперименты позволили сделать вывод о перспективах применения оптоволоконных датчиков Фабри-Перо для контроля и анализа концентрации парниковых газов (углекислый газ, метан и закись азота), в атмосфере при соответствующем выборе поглощающего материала чувствительного элемента. Показано, что реально достижимый предел разрешающей способности позволяет определять изменение диэлектрической проницаемости полимерной пленки в четвертом знаке после запятой.

Ключевые слова: оптоволоконная сенсорная система; интерферометр Фабри-Перо; анализ концентрации парниковых газов; математическая модель; цифровой двойник.

Введение

Изменение климата стало одной из важнейших проблем, стоящих перед странами по всему земному шару в последние годы. Директивой Евросоюза № 2003/87 установлены критерии определения лимитов и распределения квот выбросов парниковых газов, в целях осуществления Киотского протокола. Например, объемы выбросов углекислого газа (CO₂) к 2030 году должны быть сокращены на 55 % от величины его выбросов в 1999 году. К 2022 году планируется введение углеродного налога на импорт продукции, получение которой сопряжено с выбросами парниковых газов. Разрабатываются международные, национальные региональные, и локальные способы ограничения содержания парниковых газов в атмосфере Земли, в основе которых лежит их количественное определение, мониторинг и верификация их выбросов [1–3].

В Российской Федерации принят ряд правовых документов, предназначенных для снижения климатических рисков. Среди них: распоряжение Президента Российской Федерации от 17.12.2009 № 861-рп «О Климатической доктрине Российской Федерации» [4], которая является основой формирования и реализации политики в области климата; указ Президента Российской Федерации от 30.09.2013 № 752 «О сокращении выбросов парниковых газов» [5]; приняты постановления и распоряжения Правительства Российской Федерации, регламентирующие порядок формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации; Президентом Российской Федерации 02.07.21 года подписан федеральный закон Российской Федерации «Об ограничении выбросов парниковых газов» [6]; национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ-Р ИСО 14064-1-2007, определяет требования по количественному определению парниковых газов [7]; национальный стандарт РФ ГОСТ-Р 56276 — 2014/ISO/TS

14067:2013 «Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению и предоставлению информации» [8] соответствует международному стандарту ISO/TS 14067:2013 «Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication» [9], который ставит своей целью установить конкретные требования при количественном определении и предоставлении информации по углеродному следу продукции; утвержден указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021г. № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» [10].

В числе стратегических национальных приоритетов указано достижение целей обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Одной из задач данного направления является формирование системы государственного регулирования выбросов парниковых газов, первым этапом которой является внедрение автоматических средств измерений концентраций парниковых газов.

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» разработал проект национального стандарта Российской Федерации «Система автоматических средств измерений и учета объема и (или) массы выбросов загрязняющих веществ и концентрации загрязняющих веществ в промышленных выбросах». Этот проект стандарта устанавливает технические и метрологические требования, и распространяется на все системы автоматических средств измерений и учета выбросов, которые применяются для экологического мониторинга.

Очень важно определить методы и технологии анализа концентрации парниковых газов. В реестре автоматических средств измерений и учета выбросов, которые применяются для контроля выбросов парниковых газов, оптические методы анализа представлены крайне ограниченно. По сравнению с другими аналитическими методами определения, оптические методы обладают рядом преимуществ, поскольку не являются разрушающим или химически агрессивными, а также не чувствительны к электромагнитным помехам. Оптический контроль может производиться на любом расстоянии — от нескольких миллиметров до нескольких сот километров. Существует возможность контроля жидких, твердых или газообразных сред. По ширине охватываемого диапазона концентраций оптические методы перекрывают все другие инструментальные методы. Волоконно-оптические датчики точечного или распределенного типа позволяют осуществлять контроль и измерение концентрации парниковых газов в зоне их выбросов. Оптоволоконные датчики могут быть объединены в сеть произвольной топологии и конфигурации. Точечные волоконно-оптические датчики хорошо известны своими преимуществами, такими как компактный размер, низкую стоимость, высокую чувствительность и возможность мультиплексирования.

Оптоволоконный резонатор Фабри-Перо с открытым резонатором является классическим чувствительным элементом датчиков концентрации и изготавливается путем сращивания капиллярных трубок или фотонно-кристаллических волокон с одномодовым волокном [11,12]. Конструкция открытого резонатора позволяет газу свободно войти и выйти в область резонатора, чтобы изменить коэффициент преломления среды. Тем не менее, открытые резонаторы Фабри-Перо не в состоянии идентифицировать конкретный газ в том числе CO_2 . Кроме того, изменение концентрации газа слишком мало, чтобы заметно изменить коэффициент преломления, достаточно для того, чтобы его обнаружить. Таким образом, ключевым моментом создания резонатора Фабри-Перо для обнаружения CO_2 является поиск или создание материала показатель преломления которого заметно чувствителен к концентрации CO_2 [13].

Прозрачные функциональные материалы, чувствительные к CO_2 , могут быть использованы в качестве материала полости резонатора Фабри-Перо. Материал чувствительного слоя должен взаимодействовать с CO_2 и изменять его показатель преломления. Тем не менее, известны датчики с использованием функционального материала, как правило, на основе волоконно-оптического рефрактометра, который работает на основе затухания света

и коэффициент затухания определяется самим материалом чувствительного слоя. В [14] предложен датчик, основанный на волоконной брэгговской решетке с длинным периодом, покрытой фенолом, который чувствителен к CO_2 . Там же показано, что контроль концентрации CO_2 осуществим в диапазоне от 10 до 90 %. В [15] сообщается о датчике концентрации CO_2 на основе волоконной брэгговской решетки с длинным периодом, покрытой слоем полистирола 365 нм и полученной чувствительности 1.23 пм/%. В [16] предложен кремниевый фотонный рефрактометрический датчик CO_2 , в котором используется микрокольцевой резонатор (с диаметром 20 мкм), покрытый слоем гуанидинового полимера толщиной в 240 нм, а чувствительность датчика составляет 35.4 пм/%. Таким образом, разработка датчиков такого типа отличается простотой, использованием недорогих поглощающих материалов, долговечностью, простотой в обслуживании.

Аналогичные разработки имеются для контроля оксидов азота (NO_x), в которых используются оптические и электрические свойства полупроводниковых структур на основе молекулярных комплексов фталоцианинов, содержащих ионы лантанидов в качестве комплексообразователя, хорошо изученные и распространенные в России. Для контроля кислорода (O_x) используются золотые пленки. Для контроля метана (CH_4) более пригодны лидарные методы, но существуют и сенсоры на базе резонатора Фабри-Перо, хотя волоконно-оптические компоненты в среднем инфракрасном диапазоне, такие как источник света, фотодетектор и даже само оптическое волокно для метана, пока достаточно дороги.

Таким образом, актуальной задачей является разработка математической модели оптоволоконного датчика на базе резонатора Фабри-Перо, позволяющая исследовать физику явления и определить рекомендации к диапазону выбора параметров полимерных покрытий, обеспечивающих заметный диапазон изменения коэффициента преломления чувствительного вещества. Коэффициент преломления в свою очередь зависит от диэлектрической и магнитной проницаемости, рекомендации к определению величин которых, должны быть получены по результатам исследования математической модели.

Структурная схема чувствительного элемента

Модель резонатора Фабри-Перо [17–19] можно представить в виде слоистой структуры, состоящей из трех различных однородных слоев сквозь которые распространяется плоская монохроматическая волна оптического излучения. Структурная схема резонатора Фабри-Перо с тонкой полимерной мембраной на торце оптического волокна в качестве чувствительного элемента, приведена на рисунке 1. На торец оптического волокна нанесена мембрана из прозрачного органического полимерного материала, толщиной h (пленка на рисунке 1 показана зеленым цветом). Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления полимерной мембраны зависит от концентрации исследуемого газа [13,20,21].

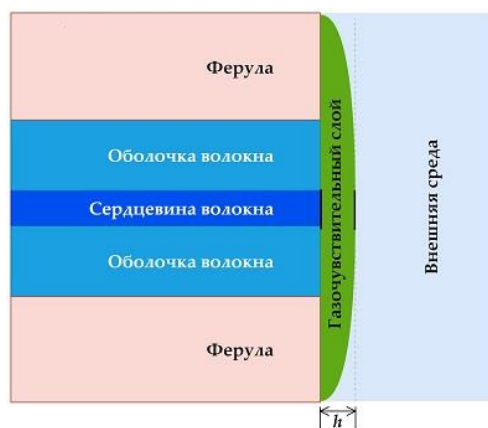


Рис. 1. Структурная схема оптоволоконного резонатора Фабри-Перо

Разница показателей преломления на двух границах раздела сред вызывает частичное прохождение и отражение света и формирует зеркала Фабри-Перо, что приводит к появлению частотного резонанса. Спектральная форма резонанса и положение максимумов зависят от толщины мембраны, внешней температуры, ее диэлектрической и магнитной проницаемости, которые в свою очередь зависят от концентрации газа. Результатом прохождения широкополосного оптического излучения через зеркала Фабри-Перо будет изменение спектра излучения, заключающегося в появлении выраженных максимумов и минимумов в спектре [18,22,23], рисунок 2:

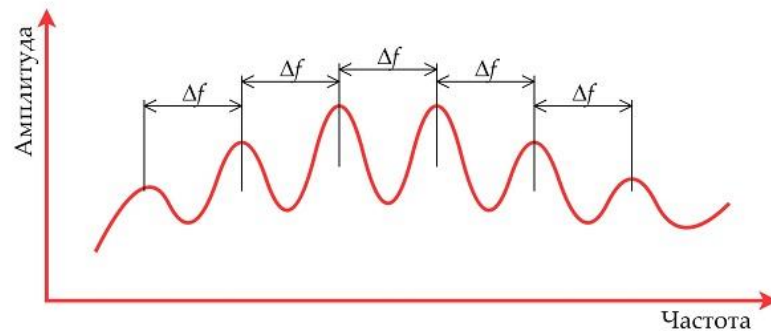


Рис. 2. Схема спектрального отклика резонатора Фабри-Перо

Шаг гребенки, форма и положение пиков определяется параметрами измерительной системы. Контроль спектра излучения и положения максимумов резонанса Фабри-Перо позволяет сделать вывод об изменении показателя преломления, диэлектрической и магнитной проницаемости мембраны, а вместе с тем и концентрации газа, при неизменной длине резонатора. Величина шага резонанса и положение пиков Фабри-Перо не зависит от интенсивности излучения, что определяет предложенный метод измерений как частотный, что качественно определяет его характеристику.

Математическая модель

Рассмотрим модель распространения плоской монохроматической волны через одномерную слоистую структуру. Предложенная аппроксимация оправдана тем, что толщина мембраны соизмерима с длиной волны излучения, диаметр оптического волокна не превышает нескольких десятков длины волны, а распространение света идет вдоль сердцевинки оптического волокна. Схема распространения электромагнитного излучения через одномерную трехслойную структуру, состоящую из сердцевинки оптического волокна, полимерной пленки и атмосферы, приведена на рисунке

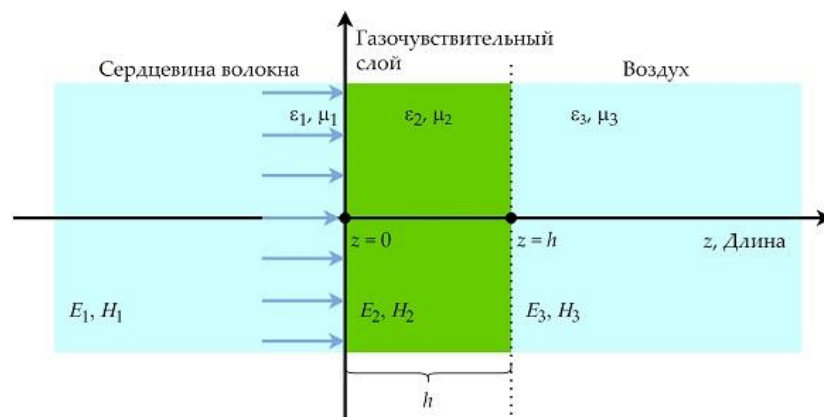


Рис. 3. Одномерная модель резонатора Фабри-Перо

Введем обозначения: t_i — коэффициент прохождения и r_i — отражения при прохождении излучения через i -ый слой; κ_i — волновое число, w_i — волновое сопротивление слоя для i -го слоя. Первый слой является сердцевинной оптического волокна, второй слой — полимерный чувствительный элемент, третий слой — атмосфера.

Волновое число и волновое сопротивление для каждой среды определяется как зависимость от частоты излучения, диэлектрической и магнитная проницаемости:

$$\kappa_i(\lambda, \varepsilon_i, \mu_i) = \omega \sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_0 \mu_i \mu_0} = \frac{2\pi c \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_i \mu_i}, \quad w_i(\mu_i, \varepsilon_i) = \sqrt{\mu_i \mu_0 / \varepsilon_i \varepsilon_0}, \quad (1)$$

где, $\lambda = c/f$ — длина волны, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота, ε_i — диэлектрическая проницаемость, μ_i — магнитная проницаемость вещества, которые определяются соответствующими коэффициентами среды, умноженными на ε_0 — абсолютную диэлектрическую и μ_0 — абсолютную магнитную проницаемости вакуума, c — скорость света в вакууме.

Уравнения для электрического и магнитного полей в зависимости от координаты Oz вдоль оси распространения имеют в вид:

$$\begin{aligned} E_i(z) &= t_i \cdot e^{-j\kappa_i z} + r_i \cdot e^{j\kappa_i z}, \\ H_i(z) &= \frac{t_i \cdot e^{-j\kappa_i z} - r_i \cdot e^{j\kappa_i z}}{w_i}, \end{aligned} \quad (2)$$

Амплитуда исходного излучения принимается равной единице, поскольку требуется определить коэффициенты отражения и пропускания для каждого слоя. Условия, обеспечивающие непрерывность распространения электромагнитной волны, заключаются в равенстве электрического и магнитного поля на границах раздела сред. На первой границе раздела, при $z = 0$:

$$\begin{cases} E_1(0) = E_2(0) \\ H_1(0) = H_2(0) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_1 + r_1 = t_2 + r_2 \\ \frac{t_1 - r_1}{w_1} = \frac{t_2 - r_2}{w_2} \end{cases}, \quad (3)$$

и на второй границе, при $z = h$:

$$\begin{cases} E_2(h) = E_3(h) \\ H_2(h) = H_3(h) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t_2 \cdot e^{-j\kappa_2 h} + r_2 \cdot e^{j\kappa_2 h} = t_3 \cdot e^{-j\kappa_3 h} + r_3 \cdot e^{j\kappa_3 h} \\ \frac{t_2 \cdot e^{-j\kappa_2 h} - r_2 \cdot e^{j\kappa_2 h}}{w_2} = \frac{t_3 \cdot e^{-j\kappa_3 h} - r_3 \cdot e^{j\kappa_3 h}}{w_3} \end{cases}. \quad (4)$$

Считаем, что все излучение, пришедшее от со стороны источника излучения в первый слой, проходит сквозь него без потерь; отражение от дальней границы третьего слоя отсутствует. Эти условия позволяют определить коэффициенты прохождения отражения для первого и третьего слоев:

$$t_1 = 1, \quad r_3 = 0. \quad (5)$$

Подставив (5) в (3) и (4), получим систему из четырех линейных уравнений относительно четырех неизвестных комплексных величин r_1, t_2, r_2, t_3 , которую удобно записать в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 \\ -w_2 & -w_1 & w_1 & 0 \\ 0 & e^{-j\kappa_2 h} & e^{j\kappa_2 h} & -e^{-j\kappa_3 h} \\ 0 & w_3 e^{-j\kappa_2 h} & -w_3 e^{j\kappa_2 h} & -w_2 \cdot e^{-j\kappa_3 h} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_1 \\ t_2 \\ r_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ -w_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Система уравнений (6) позволяет получить аналитическое решение для всех иско-
мых величин:

$$\left\{ \begin{aligned} r_1(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) &= \frac{\cos\left(\kappa_2 h + \frac{j}{2} \ln\left(\frac{w_2(-w_1 - w_2 + w_3) + w_1 w_3}{w_2(-w_1 + w_2 + w_3) - w_1 w_3}\right)\right)}{\cos\left(\kappa_2 h + \frac{j}{2} \ln\left(\frac{w_2(w_1 - w_2 + w_3) - w_1 w_3}{w_2(w_1 + w_2 + w_3) + w_1 w_3}\right)\right)} \\ t_2(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) &= \frac{(w_1 + w_2)}{2w_1} - \frac{(w_2 - w_1)}{2w_1} \cdot r_1(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) \\ r_2(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) &= \frac{(w_3 - w_2)}{(w_3 + w_2)} e^{-2j\kappa_2 h} \cdot t_2(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) \\ t_3(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) &= \frac{w_3}{w_2} e^{-j(\kappa_2 - \kappa_3)h} \cdot t_2(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) - \frac{w_3}{w_2} e^{j(\kappa_2 + \kappa_3)h} \cdot r_2(\lambda, h, \varepsilon_i, \mu_i) \end{aligned} \right. , \quad (7)$$

где волновое сопротивление и волновое число выражаются через длину волны, диэлектри-
ческую и магнитную проницаемости из (1). Изменение длины волны излучения λ позволяет
моделировать спектр прохождения широкополосного оптического излучения через резона-
тор Фабри-Перо. В общем случае параметры диэлектрической и магнитной проницаемости
 ε_i , μ_i , входящие в волновое число κ_i и волновое сопротивление w_i , толщина мембраны h за-
висят температуры и влажности.

Анализ систем уравнений (6) и (7) позволяет исключить из них абсолютные диэлек-
трическую и магнитную проницаемости вакуума, поскольку:

$$c \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \equiv 1, \quad (8)$$

где c — скорость света. В уравнениях (6) и (7) все соотношения можно сократить на квад-
ратный корень из произведения диэлектрической и магнитной проницаемости, а выражения
для волнового числа записать через длину волны, и в дальнейших вычислениях ε_0 и μ_0 ис-
ключить.

Сравнение результатов моделирования и данных эксперимента

Верификация математической модели осуществлялась на экспериментальной лабо-
раторной установке. Резонатор Фабри-Перо был собран на торце оптического волокна,
находящегося в оптическом разъеме, на торец которого была нанесена пленка из поликар-
боната $\sim 15 \pm 2$ мкм, толщина которой была оценена на лабораторном микроскопе Levenhuk
DST 90.



Рис.4. Лабораторный образец резонатора Фабри-Перо

Для анализа спектра, получаемого от резонатора Фабри-Перо, был использован лабораторный анализатор спектра, созданный на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий в КНИТУ-КАИ на базе IMON-512 [24], обеспечивающий разрешающую способность по длине волны в 1 пм с динамическим диапазоном измерений до 2^{16} безразмерных единиц мощности, при дополнительной математической обработке спектра, рисунок 5. Все измерения осуществлялись при условно постоянной комнатной температуре ($T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$), что минимизировало влияние внешней температуры полей на результаты измерений.

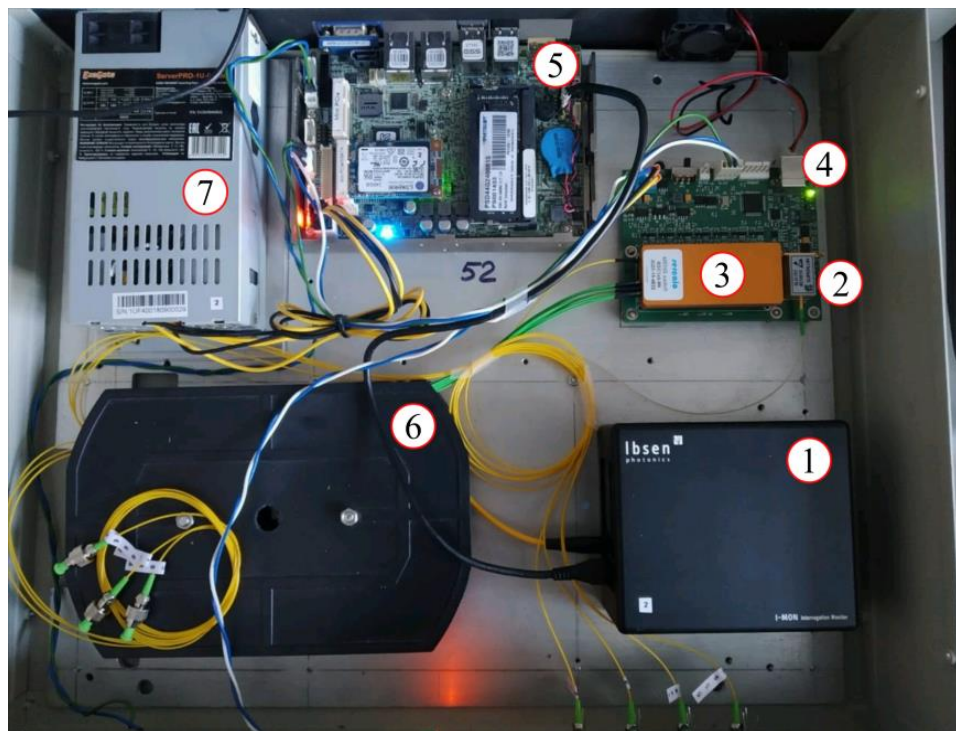


Рис. 5. Анализатор спектра: 1 – IBSEN I-MON 512 USB; 2 – источник широкополосного излучения SLD-761-HP1-DIL; 3 – переключатель оптических каналов Sercalo MEMS switch rSC 1x8; 4 – модуль управления источником излучения и переключением оптических каналов; 5 – компьютер Wafer ULT-3; 6 – оптический модуль; 7 – источник питания

Для проверки адекватности математической модели была проведена серия расчетов, которая моделировала прохождение широкополосного излучения в диапазоне длин волн от $\lambda_{\text{Min}} = 1510\text{ нм}$ до $\lambda_{\text{Max}} = 1590\text{ нм}$, соответствующему диапазону длин волн лабораторного анализатора спектра. Источник излучения (сонолюминисцентный диод с широкополосным спектром) моделировался кривой гаусса вида:

$$L(\lambda) = A_L \exp\left(-(\lambda - \lambda_L)^2 / 2\sigma^2\right) + A_N \cdot \text{Noise}(\lambda), \quad (9)$$

где параметры A_L — отвечает за амплитуду, σ — за ширину спектра излучения, и λ_L — за центральную частоту излучения и определяются методом наименьших квадратов при сопоставлении реального спектра излучения фотолюминесцентного диода и его аналитической

записи (9). Амплитуда шума A_N и характер его распределения $Noise(\lambda)$ подбирались эмпирически.

Толщина пленки h варьировалась в диапазоне от 15 до 31 мкм. Примерные диэлектрические и магнитные проницаемости сердцевины оптического волокна, полимерной пленки и воздуха приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Диэлектрические и магнитные проницаемости веществ

	Диэлектрическая проницаемость	Магнитная проницаемость
Кварцевое стекло	$2.13 \cdot (1 - j \cdot 1.0 \cdot 10^{-10})$	0.9999
Полимерная пленка (поликарбонат)	$3.80 \cdot (1 - j \cdot 7.0 \cdot 10^{-4})$	0.866
Воздух	$1.00057 \cdot (1 - j \cdot 1.0 \cdot 10^{-5})$	1.0001

На рисунке 6 приведены экспериментально полученный спектр отражения резонанса Фабри-Перо (красная линия), возникающий при прохождении широкополосного излучения от фотолюминесцентного диода (зеленая линия) через трехслойную структуру, представляющую собой оптическое волокно с нанесенной на его торец пленкой поликарбоната толщиной ~ 15 мкм, и спектр, полученный по результатам численного моделирования при толщине пленки 17.71 мкм (синяя линия). Результирующий спектр отражения моделировался в виде произведения спектра излучения фотолюминесцентного диода (9) и коэффициента отражения $r_1(\lambda)$ как функции длины волны из (7):

$$R(\lambda) = L(\lambda) \cdot |r_1(\lambda)|, \quad (10)$$

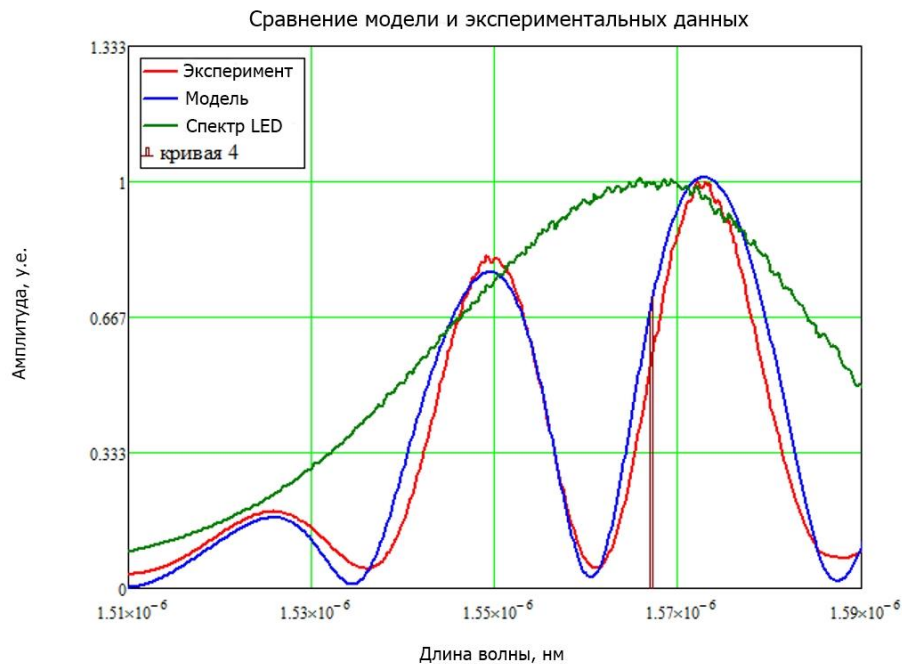


Рис. 6. Экспериментально полученный спектр Фабри-Перо для поликарбоната, нанесенного на торец оптического волокна толщиной ~ 15 мкм (красная линия), результат моделирования спектра (синяя линия); спектр исходного широкополосного излучения, используемого для засветки — зеленая линия

Определение диэлектрической проницаемости полимерной мембраны

Имеющийся аналитический вид зависимости коэффициента отражения $r_0(\lambda)$ в предположении, что коэффициенты диэлектрической и магнитной проницаемости кварцевого стекла и воздуха неизменны и неизменен коэффициент магнитной проницаемости пленки, позволяет определить величину диэлектрической проницаемости пленки ε_2 , соответствующей экспериментально полученному спектру, потребовав минимум функционала вида:

$$\Phi(\varepsilon_2) = \sum_{k=1}^N \left(L(\lambda_k) \cdot |r_1(\lambda_k, \varepsilon_2)| - L_k \right)^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где L_k — экспериментально полученный спектр, $L(\lambda_k)$ — спектр фотолюминесцентного диода, $r_1(\lambda, \varepsilon_2)$ — аналитический вид зависимости коэффициента отражения из (7), N — количество точек в полученном спектре, λ_k — длины волн.

Требование минимума (11) влечет за поиск корня уравнения:

$$\sum_{k=1}^N \left(L(\lambda_k) \cdot |r_1(\lambda_k, \varepsilon_2)|^2 - R_k \right) \cdot L(\lambda_k) \cdot \frac{d|r_1(\lambda_k, \varepsilon_2)|^2}{d\varepsilon_2} = 0, \quad (12)$$

которое может быть найдено только численно.

Учитывая то, что ε_2 комплексная величина, то уравнение (11) позволяет восстановить лишь квадрат модуля ε_2 . Следовательно, для полного восстановления комплексной диэлектрической проницаемости ε_2 необходимо воспользоваться априорной информацией о тангенсе угла диэлектрических потерь:

$$\tan(\alpha_2) = \text{Im}(\varepsilon_2) / \text{Re}(\varepsilon_2), \quad (13)$$

Соотношение:

$$|\varepsilon_2|^2 = (\text{Re}(\varepsilon_2))^2 + (\tan(\alpha_2) \text{Re}(\varepsilon_2))^2, \quad (14)$$

позволяет отдельно выделить вещественную и мнимую составляющие коэффициента диэлектрической проницаемости:

$$\text{Re}(\varepsilon_2) = |\varepsilon_2| / \sqrt{1 + \tan^2(\alpha_2)}, \quad \text{Im}(\varepsilon_2) = \tan(\alpha_2) \cdot \text{Re}(\varepsilon_2). \quad (15)$$

Анализ разрешающей способности и чувствительности измерений

Численный анализ математической модели и данные, приведенные в [13], показали, что изменение коэффициента диэлектрической проницаемости чувствительного элемента датчика в виде полимерной пленки приводит одновременно и к изменению формы спектрального отклика и смещению всей спектральной картины по длине волны.

В работе оценена возможность определения величины смещения спектра излучения резонатора Фабри-Перо при изменении диэлектрической проницаемости полимерной пленки в узком диапазоне величин от 3.79943 до 3.80057 (при изменении на 0.00114). Смещение оценивали по величине изменения коэффициента модуляции двухчастотного излучения, направленного на середину склона одного из максимумов, после приема его на фотодетекторе. Двухчастотное излучение схематично показано на рисунке 6 линиями коричневого цвета. Полная ширина на половине высоты спектральных компонент двухчастотного излучения принималась равной 100 МГц, разностная частота 125 МГц (1 пм). На рисунке 7 приведена зависимость коэффициента модуляции от изменения диэлектрической проницаемости.

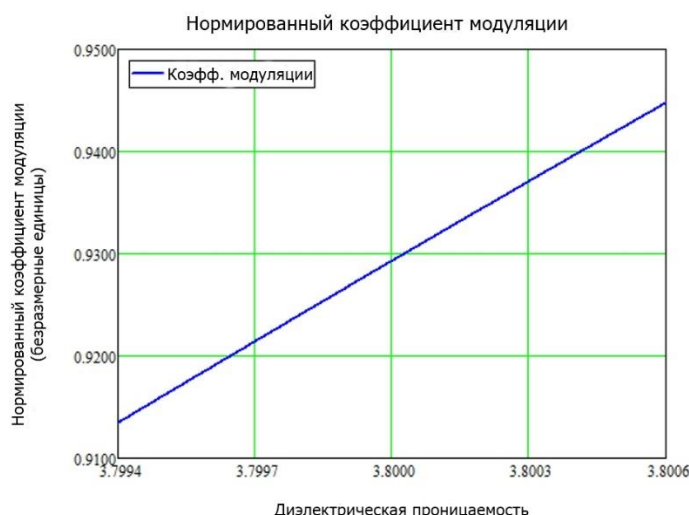


Рис.7. Зависимость нормированного коэффициента модуляции выходного тока фотоприемника двухчастотного излучения при изменении диэлектрической проницаемости полимерной пленки в диапазоне от 3.79943 до 3.80057

Результаты моделирования показывают, что изменение величины диэлектрической проницаемости в третьем знаке приводит к изменению коэффициента модуляции во втором знаке, что обеспечивает комфортные условия измерений. Квазилинейная зависимость смещения спектра от величины диэлектрической проницаемости, и разрешающая способность радиофотонного метода измерений, определяет максимальную чувствительность измерительной системы.

Полученные данные свидетельствуют о удовлетворительной корреляции данных математической модели и реального эксперимента, полученные при одних и тех же условиях, что свидетельствует о корректности выбранного подхода и соответствии математической модели реальному физическому процессу. Полученный математический двойник (математическая модель) позволяет не только исследовать изменение спектрального отклика отражения от оптоволоконного датчика Фабри-Перо в зависимости от изменения показателя диэлектрической проницаемости полимерной пленки, но и восстановить сам показатель диэлектрической проницаемости по полученному спектру излучения в предположении, что тангенс угла диэлектрических потерь в полимере постоянен.

Заключение

Математическая модель измерительной системы, позволяющей осуществлять измерения спектра отражения и пропускания резонатора Фабри-Перо, полностью соответствует экспериментальным данным и позволяет численно исследовать и предсказывать результаты экспериментальных измерений, выполненных на лабораторной установке, построенной согласно требованиям математической модели. Лабораторная установка позволяет осуществлять измерения коэффициента диэлектрической проницаемости тонкой полимерной пленки, нанесенной на торец волокна. Проведенные эксперименты открывают перспективу исследования образцов тонких мембран, коэффициент диэлектрической проницаемости которых чувствителен к концентрации различных газов. Разработанная установка открывает перспективы измерений коэффициентов преломлений жидкостей и суспензий в зависимости от концентрации тех или иных веществ, находящихся в суспензии. Зависимость результатов измерений от температуры накладывает ограничения на возможность использования предложенной лабораторной установки. Дальнейшее развитие предложенного подхода заключается во включении в измерительную систему оптоволоконного датчика температуры

и разработке совмещенного чувствительного элемента, включающего в себя не только сенсор на базе резонатора Фабри-Перо, но и интегрированный оптоволоконный датчик температуры и влажности. Включение в метод измерений процедуры совместной калибровки датчиков [25,26].

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках программы «Приоритет 2030».

Список литературы

1. *Андрусевич, А.* Климатическая политика и гражданское общество: Будущее стран восточного партнёрства в контексте европейского зелёного курса: Аналитический документ / А. Андрусевич, Н. Андрусевич, З. Козак и др. - Текст электронный. - 2020. https://www.kas.de/documents/270026/8703904/EDG%26EaPClimateNGOs_RUS.pdf (дата обращения 11.03.2022).
2. *Пахомова, Н.В.* Трансформация глобальных экологических рисков в экономические риски российских предприятий и управление их минимизацией / Н.В.Пахомова, К.К. Рихтер, Г.А. Автончук и др. // Проблемы современной экономики. - 2021. - 1 (2021). - С. 159–166.
3. *Ермакова, Е.П.* О проекте общеевропейского закона о климате и проблемах нормативного регулирования “зеленого” финансирования в Европейском Союзе/Е.П. Ермакова// Государство и право. - 2020. - С. 96–107. <https://doi.org/10.31857/S013207690009682-2>.
4. *Малинин, В.Н.* Градостроительное планирование Санкт-Петербурга в условиях современных изменений климата / В.Н. Малинин, Г.В. Менжулин, А.А. Павловский и др. // Ученые записки российского государственного гидрометеорологического университета, 2016. - С. 140–147.
5. О сокращении выбросов парниковых газов: Указ Президента РФ // Российская газета, N 223, 04.10.2013. - Собрание законодательства Российской Федерации, N 40 (ч.III), 07.10.2013, ст.5053
6. Об ограничении выбросов парниковых газов: Федеральный закон №296-83: принят Государственной думой 01 июня 2021 года: одобрен Советом Федерации 23 июня 2021года. - Российская газета. Федеральный выпуск. - 07 июля 2021г. - №147(8498).
7. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2007. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077407> (дата обращения 11.03.2022). - Текст электронный.
8. ГОСТ Р 56276 —2014/ISO/TS 14067:2013. Газы парниковые. Углеродный след продукции. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200117795> (дата обращения 11.03.2022). - Текст электронный.
9. ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases. - URL: <https://www.iso.org/standard/59521.html> (дата обращения 11.03.2022). - Текст электронный.
10. О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 г. - № 400. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001> (дата обращения 11.03.2022). - Текст электронный.
11. *Wang R.* Hybrid optical fiber Fabry–Perot interferometer for simultaneous measurement of gas refractive index and temperature / R. Wang, X. Qiao // Applied Optics. - 2014. - V. 53. - P. 7724–7728. <https://doi.org/10.1364/AO.53.007724>.

12. Wang R. Gas Refractometer Based on Optical Fiber Extrinsic Fabry—Perot Interferometer With Open Cavity / R. Wang, X. Qiao // IEEE Photonics Technologies Letters. - 2015. - V. 27 (2015) 245–248. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2365812>.
13. Ma, W. CO₂ Gas Sensing Using Optical Fiber Fabry—Perot Interferometer Based on Polyethyleneimine/Poly(Vinyl Alcohol) Coating / W. Ma, R. Wang, Q. Rong, Z. Shao, et al. // IEEE Photonics Journal. - 2017. - V. 9. - P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2700053>.
14. Gouveia, C. Measurement of CO₂ using refractometric fiber optic sensors / C. Gouveia, A. Markovics, J. Baptista, B. Kovacs, P. Jorge // Proceedings of the 3rd WSEAS international conference on Advances in sensors, signals and materials. - 2010. - P. 169–173.
15. Melo, L. Highly sensitive coated long period grating sensor for CO₂ detection at atmospheric pressure/ L. Melo, G. Burton, B. Davies, D. Risk, P. Wild, // Sensors & Actuators, B: Chemical. - 2014. - V. 202. - P. 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.05.062>.
16. Mi, G. Silicon microring refractometric sensor for atmospheric CO₂ gas monitoring / G. Mi, C. Horvath, M. Aktary, V. Van // Optics Express. - 2016. - V. 24. - P. 1773–1780. <https://doi.org/10.1364/OE.24.001773>.
17. Islam Md. Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review / Md. Islam, M. Ali, M.-H. Lai, K.-S. Lim, H. Ahmad // Sensors. - 2014. - V. 14(4). - P. 7451–7488. <https://doi.org/10.3390/s140407451>.
18. Jáuregui-Vázquez, D. An All Fiber Intrinsic Fabry-Perot Interferometer Based on an Air-Microcavity / D. Jáuregui-Vázquez, J. Estudillo-Ayala, R. Rojas-Laguna et al. // Sensors. - 2013. - V. 13. - P. 6355–6364. <https://doi.org/10.3390/s130506355>.
19. Pevec, S. Miniature fiber-optic Fabry-Perot refractive index sensor for gas sensing with a resolution of 5×10^{-9} RIU/ S. Pevec, D. Donlagic // Optics Express. - 2018. - V. 26. - P. 23868. <https://doi.org/10.1364/OE.26.023868>.
20. Luo, J. Fiber optic hydrogen sensor based on a Fabry—Perot interferometer with a fiber Bragg grating and a nanofilm / J. Luo, S. Liu, P. Chen, S. Lu et al. // Lab on a Chip. - 2021. - V. 21. - P. 1752–1758. <https://doi.org/10.1039/D1LC00012H>.
21. 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. - 2021. - V. 21. - P. 378. <https://doi.org/10.3390/s21020378>.
22. Chen, P. Cascaded-Cavity Fabry-Perot Interferometric Gas Pressure Sensor based on Vernier Effect / P. Chen, Y. Dai, D. Zhang, X. Wen, M. Yang // Sensors. - 2018. - V. 18. - P. 3677. <https://doi.org/10.3390/s18113677>.
23. Shrivastav, A.M. Microstructured optical fiber based Fabry—Pérot interferometer as a humidity sensor utilizing chitosan polymeric matrix for breath monitoring / A.M. Shrivastav, D.S. Gunawardena, Z. Liu, H.-Y. Tam // Scientific Reports. - 2020. - V. 10. - P. 6002. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62887-y>.
24. Anfinogentov, V. Algorithm of FBG Spectrum Distortion Correction for Optical Spectra Analyzers with CCD Elements / V. Anfinogentov, K. Karimov, A. Kuznetsov et al. // Sensors. - 2021. - V. 21. - P. 2817. <https://doi.org/10.3390/s21082817>.
25. Sahabutdinov, A.Z. Calibration of combined pressure and temperature sensors / Sahabutdinov, A.Z., Kuznetsov, A.Z., Nureev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. - 2015. - V. 10. - P. 44948–44957.
26. Sun, Y.C. Accurate wavelength calibration method for compact CCD spectrometer/ Y.C. Sun, C. Huang, G. Xia, S.Q. Jin, H.B. Lu // Journal of the Optical Society of America. - 2017. - V. 34. - P. 498–505. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.000498>.

DIGITAL TWIN OF THE FABRY-PEROT SENSOR FOR GREENHOUSE GAS CONCENTRATION MONITORING

*A.Zh. Sakhabutdinov¹, V.A. Anfinogentov¹, O.G. Morozov¹, Yu.A. Tunakova¹,
M.P. Danilaev¹, I.I. Nureev¹, A.A. Kuznetsov¹, K.A. Lipatnikov¹,
A.R. Shagidullin², K.G. Karimov¹, S.M.R.H. Hussein³, B.I. Valeev¹*

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
Russian Federation, 420111, Kazan, K. Marx, 10

²Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences
Russian Federation, 420087, Kazan, st. Dauskaya, 28

³University of Kerbala, 56001, Kerbala, Iraq

Annotation. The paper presents a mathematical model of a Fabry-Perot fiber-optic sensor implemented at the end of an optical fiber by depositing a thin polymer film sensitive to the concentration of greenhouse gases. Verification of the mathematical model with the results of full-scale experiments and data of other authors was carried out in order to use it as a digital twin of the sensitive element of the sensor. The numerical and natural experiments carried out made it possible to draw a conclusion about the prospects for the use of fiber-optic Fabry-Perot sensors for monitoring and analyzing the concentration of greenhouse gases (carbon dioxide, methane and nitrous oxide) in the atmosphere with an appropriate choice of the absorbing material of the sensitive element. It is shown that the really achievable limit of resolution makes it possible to determine the change in the dielectric constant of a polymer film in the fourth decimal place.

Key words: fiber optic sensor system; Fabry-Perot interferometer; greenhouse gas concentration analysis; mathematical model; digital twin.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2022 г.