

Математическая модель датчика контроля парниковых газов на основе интерферометра Фабри-Перо

А.Ж. Сахабутдинов¹, В.А. Анфиногентов¹, О.Г. Морозов¹, Ю.А. Тунакова¹, М.П. Данилаев¹, И.И. Нуреев¹, И.Н. Ростокин², А.А. Кузнецов¹, К.А. Липатников¹, А.Р. Шагидуллин¹, К.Г. Каримов¹, С.М.Р.Х. Хуссейн¹, Б.И. Валеев¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
e-mail: azhsakhabutdinov@kai.ru

² Муромский институт (филиал) ФГБОУ «Владимирский государственный университет
им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264, Муром, Владимирская область, ул. Орловская, д.23.
e-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

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.

Mathematical model of greenhouse gas control sensor based on Fabry-Perot interferometer

A.Zh. Sakhabutdinov¹, V.A. Anfinogentov¹, O.G. Morozov¹, Y.A. Tunakova¹, M.P. Danilaev¹, I.I. Nureev¹, I.N. Rostokin², A.A. Kuznetsov¹, K.A. Lipatnikov¹, A.R. Shagidullin¹, K.G. Karimov¹, S.M.R.H. Hussein¹, B.I. Valeev¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI

² Murom Institute (branch) of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov.

The paper presents a mathematical model of a fiber-optic Fabry-Perot sensor implemented at the end of an optical fiber by applying a thin polymer film with sensitivity to the concentration of greenhouse gases. The mathematical model has been verified with the results of field experiments and data of other authors in order to use it as a digital twin of the sensor's sensitive element. Numerical and in-situ experiments made it possible to conclude about the prospects of using fiber-optic Fabry-Perot sensors for control and analysis of greenhouse gas (carbon dioxide, methane and nitrous oxide) concentrations in the atmosphere with an appropriate choice of an absorbing material of a sensitive element. It is shown that the really achievable limit of the resolving ability allows to determine the change in the dielectric permittivity of the polymer film in the fourth decimal place. Keywords: fiber-optic sensor system; Fabry-Perot interferometer; greenhouse gas concentration analysis; mathematical model; digital twin.

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 (CO_2) 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].

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 [4, 5]. 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 [6].

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 [7–9] можно представить в виде слоистой структуры, состоящей из трех различных однородных слоев сквозь которые распространяется плоская монохроматическая волна оптического излучения. На торец оптического волокна нанесена мембрана из прозрачного органического полимерного материала, толщиной h (пленка на рис. 1 показана зеленым цветом). Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления полимерной мембраны зависит от концентрации исследуемого газа [6, 10, 11].

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 [8, 12, 13].

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 рис. 1. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

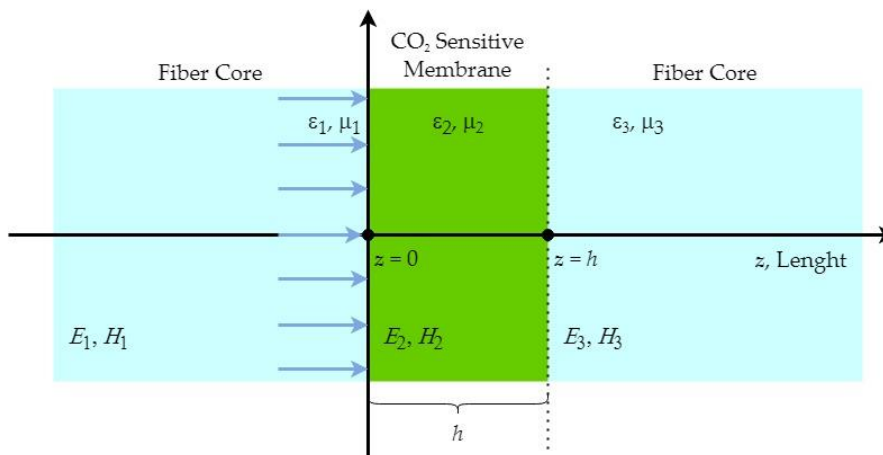


Рис. 1. Одномерная модель резонатора Фабри-Перо

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 сердцевиной 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 - абсолютной 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 и 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 искомых величин:

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

где волновое сопротивление и волновое число выражаются через длину волны, диэлектрическую и магнитную проницаемости из (1). Изменение длины волны излучения λ позволяет моделировать спектр прохождения широкополосного оптического излучения через резонатор 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 зависят температуры и влажности.

Анализ систем уравнений (6) и (7) позволяет исключить из них абсолютные диэлектрическую 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 квадратный 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 исключить.

Сравнение результатов моделирования и данных эксперимента

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



Рис. 2. 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 [14], обеспечивающий разрешающую способность по длине волны в 1 пм с динамическим диапазоном измерений до 2^{16} безразмерных единиц мощности, при дополнительной математической обработке спектра. Все измерения осуществлялись при условно постоянной комнатной температуре ($T = 22$ °C), что минимизировало влияние внешней температуры полей на результаты измерений.

Для проверки адекватности математической модели была проведена серия расчетов, которая моделировала прохождение широкополосного излучения в диапазоне длин волн от $\lambda_{\text{Min}} = 1510$ нм до $\lambda_{\text{Max}} = 1590$ 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 $\text{Noise}(\lambda)$ 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 рис.3 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):

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

Анализ разрешающей способности и чувствительности измерений

Численный анализ математической модели и данные, приведенные в [6, с. 2], 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 рис. 3 линиями коричневого цвета.

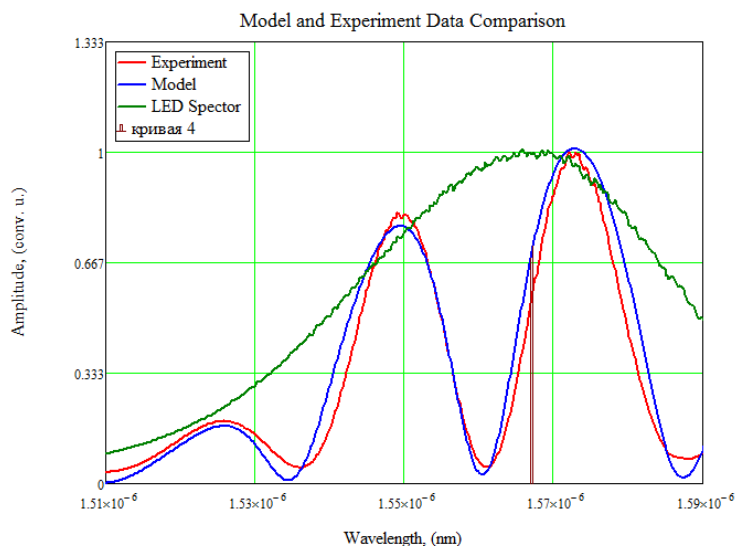


Рис. 3. Экспериментально полученный спектр Фабри-Перо для поликарбоната, нанесенного на торец оптического волокна толщиной ~15 мкм (красная линия), результат моделирования спектра (синяя линия); спектр исходного широкополосного излучения, используемого для засветки - зеленая линия

Полная ширина на половине высоты спектральных компонент двухчастотного излучения принималась равной 100 МГц, разностная частота 125 МГц (1 пм). На рис. 4 приведена зависимость коэффициента модуляции от изменения диэлектрической проницаемости.

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.

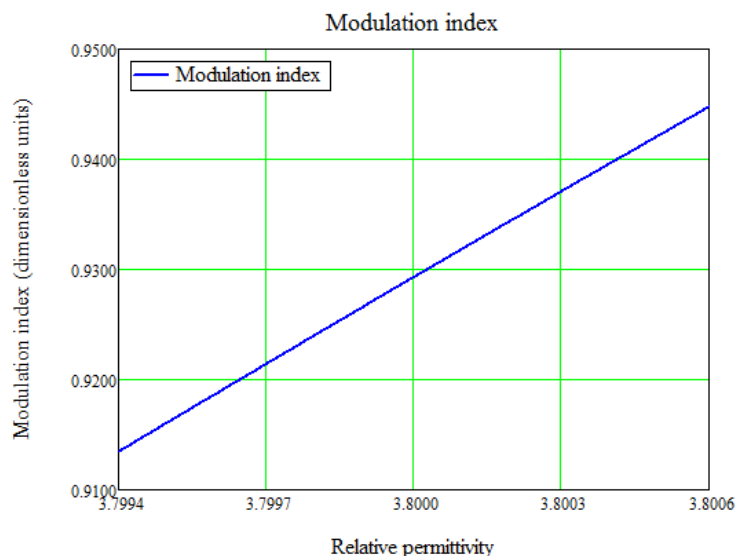


Рис. 4. Зависимость нормированного коэффициента модуляции выходного тока фотоприемника двухчастотного излучения при изменении диэлектрической проницаемости полимерной пленки в диапазоне от 3.79943 до 3.80057

Выводы

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 [15, 16].

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

Литература

1. А. Андрусевич, Н. Андрусевич, З. Козак, и С. Романко, Климатическая политика и гражданское общество: Будущее стран Восточного партнёрства в контексте Европейского зелёного курса, Аналитический документ. 2020.
2. Н. В. Пахомова, К. К. Рихтер, Г. А. Автончук, и Г. Б. Малышков, «Трансформация глобальных экологических рисков в экономические риски российских предприятий и

- управление их минимизацией», Проблемы Современной Экономики, т. 1, вып. 77, сс. 159–166, 2021.
3. Е. П. Ермакова, «О проекте общеевропейского закона о климате и проблемах нормативного регулирования „зеленого“ финансирования в Европейском Союзе», Государство и Право, вып. 5, сс. 96–107, 2020, doi: 10.31857/S013207690009682-2.
 4. R. Wang и X. Qiao, «Hybrid optical fiber Fabry–Perot interferometer for simultaneous measurement of gas refractive index and temperature», Appl. Opt., т. 53, вып. 32, сс. 7724–7728, ноя. 2014, doi: 10.1364/AO.53.007724.
 5. R. Wang и X. Qiao, «Gas Refractometer Based on Optical Fiber Extrinsic Fabry–Perot Interferometer With Open Cavity», IEEE Photonics Technol. Lett., т. 27, вып. 3, сс. 245–248, фев. 2015, doi: 10.1109/LPT.2014.2365812.
 6. W. Ma и др., «CO₂ Gas Sensing Using Optical Fiber Fabry–Perot Interferometer Based on Polyethyleneimine/Poly(Vinyl Alcohol) Coating», IEEE Photonics J., т. 9, вып. 3, сс. 1–8, июн. 2017, doi: 10.1109/JPHOT.2017.2700053.
 7. Md. Islam, M. Ali, M.-H. Lai, K.-S. Lim, и H. Ahmad, «Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review», Sensors, т. 14, вып. 4, сс. 7451–7488, апр. 2014, doi: 10.3390/s140407451.
 8. D. Jáuregui-Vázquez и др., «An All Fiber Intrinsic Fabry-Perot Interferometer Based on an Air-Microcavity», Sensors, т. 13, вып. 5, сс. 6355–6364, май 2013, doi: 10.3390/s130506355.
 9. S. Pevec и D. Donlagic, «Miniature fiber-optic Fabry-Perot refractive index sensor for gas sensing with a resolution of 5×10^{-9} RIU», Opt. Express, т. 26, вып. 18, с. 23868, сен. 2018, doi: 10.1364/OE.26.023868.
 10. J. Luo и др., «Fiber optic hydrogen sensor based on a Fabry–Perot interferometer with a fiber Bragg grating and a nanofilm», Lab. Chip, т. 21, вып. 9, сс. 1752–1758, 2021, doi: 10.1039/D1LC00012H.
 11. N. L. Kazanskiy, M. A. Butt, и S. N. Khonina, «Carbon Dioxide Gas Sensor Based on Polyhexamethylene Biguanide Polymer Deposited on Silicon Nano-Cylinders Metasurface», Sensors, т. 21, вып. 2, Art. вып. 2, янв. 2021, doi: 10.3390/s21020378.
 12. P. Chen, Y. Dai, D. Zhang, X. Wen, и M. Yang, «Cascaded-Cavity Fabry-Perot Interferometric Gas Pressure Sensor based on Vernier Effect», Sensors, т. 18, вып. 11, с. 3677, окт. 2018, doi: 10.3390/s18113677.
 13. A. M. Shrivastav, D. S. Gunawardena, Z. Liu, и H.-Y. Tam, «Microstructured optical fiber based Fabry–Pérot interferometer as a humidity sensor utilizing chitosan polymeric matrix for breath monitoring», Sci. Rep., т. 10, вып. 1, с. 6002, дек. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-62887-y.
 14. V. Anfinogentov и др., «Algorithm of FBG Spectrum Distortion Correction for Optical Spectra Analyzers with CCD Elements», Sensors, т. 21, вып. 8, Art. вып. 8, апр. 2021, doi: 10.3390/s21082817.
 15. A. Z. Sahabutdinov и др., «Calibration of combined pressure and temperature sensors», Int. J. Appl. Eng. Res., т. 10, вып. 24, Art. вып. 24, 2015.
 16. Y. C. Sun, C. Huang, G. Xia, S. Q. Jin, и H. B. Lu, «Accurate wavelength calibration method for compact CCD spectrometer», JOSA A, т. 34, вып. 4, Art. вып. 4, апр. 2017, doi: 10.1364/JOSAA.34.000498.