بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

افزایش حساسیت سنسورهای مبتنی بر فیبر نوری گاز دی‌اکسیدکربن با روش ورنیه

محمد طیبی نژاد ، عبداله علیزاده ، فریبرز رحیمی

بناب، انتهای بزرگراه ولایت، دانشگاه بناب، گروه مهندسی برق –الکترونیک، کد پستی ۵۵۵۱۷۶۱۱۶۷
Email: m.taieby.nejad@gmail.com
Email: alizadeh@bonabu.ac.ir

چکیده – در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی سنسور گاز دی‌اکسیدکربن جهت اندازه‌گیری غلظت‌هایی بین ۰/۱ تا ۵۰۰ ppm پرداخته شده است. اطلاعات مربوط به گاز دی‌اکسیدکربن را در دمای ۲۹۸ درجه کلوین و فشار ۱ اتمسفر وارد نرم افزار شبیه‌سازی می شود. در مرحله بعد به طراحی ساختار سنسور با استفاده از روش ورنیه به انتخاب طول موج مشخص و در محدوده طیف جذبی گاز دی‌اکسیدکربن اقدام گردیده است. شبیه‌سازی و اخذ نتایج خروجی سنسور با استفاده از روش FDTD در محیط لومریکال انجام شده است. جهت بهینه‌سازی ساختار و افزایش حساسیت سنسور از دو طول موج جذب متفاوت گاز و تداخل سنج ماخ ذندر بهره گیری شده است. خروجی‌ها با هم ترکیب و برای ورود به قسمت آشکارساز، آماده‌سازی شده است.

کلید واژه- سنسور گاز، طیف جذب، تشدید گرهای حلقوی نوری، تداخل سنج ماخ ذندر، اثر ورنیه.

Sensitivity increasing of carbon dioxide optical gas sensors based on Vernier effect

Mohammad Taieby Nejad, Abdollah Alizadeh, Fariborz Rahimi

Department of Electrical Engineering, University of Bonab, Bonab 5551761167, Iran,
Email: m.taieby.nejad@gmail.com
Email: alizadeh@bonabu.ac.ir

Abstract- This paper, focuses on the design and simulation of sensors capable of measuring carbon dioxide concentrations between 0.1 to 500 ppm. Carbon dioxide information at a temperature of 298 ° K and a pressure of 1 atmosphere is imported to Lumerical software for simulation. Then the sensor structure is designed based on vernier effect to select specific wavelength in the absorption spectrum of carbon dioxide. The simulated output is developed inside Lumerical using Finite-difference time-domain (FDTD) method. Sensor structure optimization and sensitivity improvement were achieved by using two distinct wavelengths of absorption for the gas, and Mach-Zehnder interferometer. The outputs were combined and prepared to enter the Detector section.

Keywords: Gas sensor, Absorption spectrum, Optical Ring Resonator, Mach-Zehnder Interferometer, Vernier Effect.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

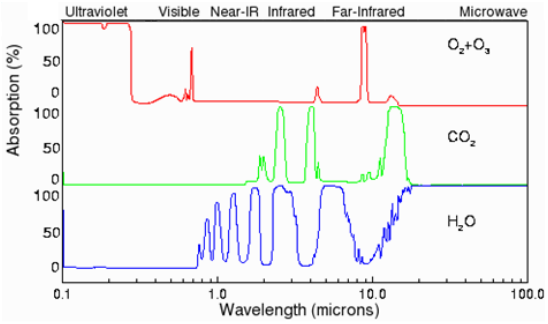
۱- مقدمه

گازهای گلخانه‌ای که دی‌اکسیدکربن نیز یکی از آنهاست باعث می‌شود اشعه خورشید با طول موج پایین به طول موج بالا تغییر یابد و پرتوهای فرابنفش به فروسرخ تبدیل گردد. اما در صورت افزایش میزان این گاز در هوا به غلظت ۲٪، اثراتی مضر بر بدن داشته و باعث بالا رفتن ضربان قلب و فشار خون می گردد و باعث می شود که اختلالاتی مانند کاهش میزان شنوایی بروز یابد. در غلظت‌های حدود ۸٪ باعث سردرد، تعرق، تاری دید و کاهش هوشیاری می گردد[۱].

در چند سال اخیر لزوم توجه به علائم تندرستی سبب شده که محققان به مطالعه و اقدام برای ساخت انواع حسگرهای زیستی مبادرت نمایند. اساس کار اغلب حسگرهای نوری بر پایه تغییر ضریب شکست نور در مرز منشور (فیبر) است[۲].

۲- مشخصات گاز CO_2

هر ماده‌ای دارای طیف جذب و عبور مشخصی می‌باشد که با استفاده از روش‌های طیف سنجی و اسپکتروسکوپی استخراج می شود که اغلب برای تشخیص و تعیین میزان ماده تحت آزمایش، مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱: طیف جذب گاز دی‌اکسیدکربن و چند گاز دیگر، محور افقی طول موج و محور عمودی درصد جذب[۶].

برای اینکه بتوانیم یک ماده جدید را در محیط نرم افزار لومریکال تعریف شبیه‌سازی نماییم نیاز به مقادیر ضریب شکست آن نسبت به طول موج داریم.

در حالت کلی ضریب شکست مختلط مواد، شامل دو قسمت حقیقی و موهومی است.

$$\bar{n} = n + ik \qquad (۱)$$

که n قسمت حقیقی به عنوان ضریب شکست و نسبت سرعت نور در خلاء به سرعت فاز است، و k قسمت موهومی، مربوط به میزان جذب ماده می باشد. ضریب شکست مختلط با عدد موج K طبق فرمول زیر مرتبط است.

$$K = 2\pi\bar{n}/\lambda_0 \qquad (۲)$$

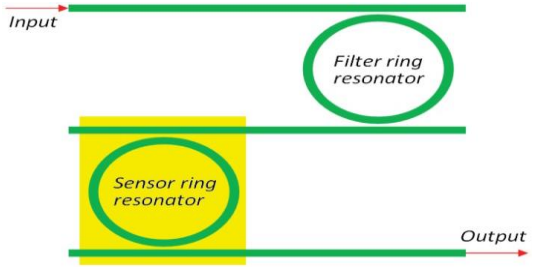
در این رابطه λ_0 طول موج در خلاء است. با جایگزاری در معادله موج تخت، می توان دید که k باعث افت دامنه در انتشار نور می شود.

$$\begin{aligned} E(z,t) &= Re\left[E_0 e^{i(Kz-\omega t)}\right] \\ &= Re\left[E_0 e^{i(2\pi(n+ik)z/\lambda_0-\omega t)}\right] \\ &= e^{-2\pi kz/\lambda_0}\, Re\left[E_0 e^{i(kz-\omega t)}\right] \end{aligned} \qquad (۳)$$

فرمول (۳) انتشار موج در زمان و مکان مشخص را بیان می کند [۹].

۳- ساختار سنسور پیشنهادی

در این سنسور از اثر ورنیه یا اثر تقسیم به درجات جزء، که از روش‌های آشکارسازی و ساخت حسگرها به شمار می رود، استفاده شده است. همان گونه که در شکل (۲) مشاهده می گردد از دو تشدید گر حلقوی به صورت آبشاری استفاده شده است[۵و۷].



شکل ۲: ساختار کلی سنسور گاز دی‌اکسیدکربن مشاهده می‌گردد. حلقه بالا به عنوان جزء اول، فیلتر و حلقه پایین، جزء دوم، سنجش را انجام می دهد[۳].

طول موثر حلقه تعیین کننده طول موج تشدید می باشد، که در طول موج تشدید، نور خروجی دارای حداقل دامنه می باشد. موقعیت طول موج تشدید متناسب با المان اندازه گیری شونده انتخاب می شود. در اصل سنجش شامل نظارت بر تغییر طول موج تشدید است به عنوان یک نتیجه از تغییرات طول یا تغییرات ضریب شکست موجبر در حضور ماده هدف، می باشد.

۳-۱- فیلتر سنسور

ابعاد و جنس این قسمت به گونه ای انتخاب شده است که در مد TE نور منبع اشعه لیزر پس از عبور از موجبر ورودی و تزویج به درون تشدیدگر حلقوی و عبور از پورت دراپ حلقه

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

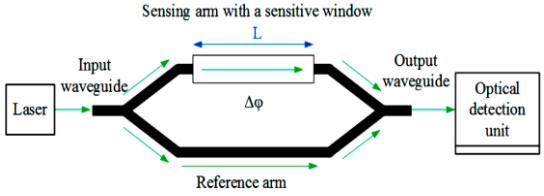
(عمل فیلتر طول موج) وارد قسمت سنجش خواهد می شود. تابع انتقال یک تشدید گر حلقوی با دو موجبر را می‌توان با روش قوانین میسون[1] مورد مطالعه قرار داد. این روش برای مدل سازی ساختارهای پیچیده نیز مناسب است[۳].
طول موج تشدید در تشدید گر حلقوی طبق رابطه (۴) می‌تواند محاسبه گردد[۴].

$$\lambda_0 = 2\pi \,.\, r \,.\, n_{eff} \,.\, m \qquad (۴)$$

که در آن r شعاع متوسط حلقه، n_{eff} ضریب شکست موثر و m یک عدد صحیح است. در این تحقیق این طول موج تشدید، از طریق انتخاب ابعاد ساختار روی طیف جذب گاز دی اکسید کربن تنظیم شده است.

۳-۲- تداخل سنج سنسور

در این مقاله برای استخراج تاثیر وجود گا از تداخل سنج ماخذندر[2] در خروجی ریز حلقه تشدید استفاده شده است.



شکل ۳:تداخل سنج ماخ ذندر و مسیر عبور نور دربازوها [۸].

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\, L}{\lambda_0}\,(n_{eff,sens} - n_{eff,ref}) \qquad (۵)$$

$\Delta\varphi$ اختلاف فاز به وجود آمده بر اثر اختلاف ضریب شکست بین هر دو بازوی مبنا و سنجش می‌باشد. $n_{eff,ref}$ و $n_{eff,sens}$ به ترتیب ضرایب شکست بازوی مبنا و بازوی سنجش می‌باشد. L اختلاف طول دو مسیر سنجش و مبنا می باشد. برای محاسبه تابع انتقال تداخل سنج ماخ ذندر

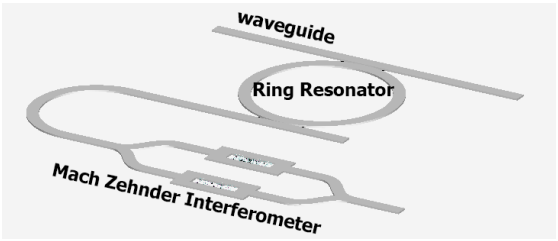
از فرمول زیر استفاده می گردد:

$$Eo = E_{in}\sqrt{\gamma_1\gamma_2}e^{j\Delta\varphi} + E_{in}\sqrt{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)} \quad (۶)$$

در فرمول ۶ مقادیر γ_1 و γ_2 تلفات موجبر در هریک از بازوهای تداخل سنج می باشد. باتقسیم Eo بر E_{in} به رابطه تابع انتقال در تداخل سنج ماخ ذندر بدست می آید.

$$\frac{Eo}{E_{in}} = \sqrt{\gamma_1\gamma_2}.e^{j\Delta\varphi} + \sqrt{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)} \qquad (۷)$$

در هریک از بازوها میزان غلظت اجزای تشکیل دهنده‌ی هوا کاملا برابر می‌باشند و فقط در بازوی سنجش گاز دی‌اکسیدکربن به محیط اضافه می‌گردد. در این صورت گاز کربن‌دی‌اکسید تنها عامل تغییر در میزان انتقال و تغییر در دامنه موج می‌باشد.



شکل۵: نمونه شبیه‌سازی شده از سنسور گاز دی‌اکسیدکربن.

۴- نتایج شبیه‌سازی

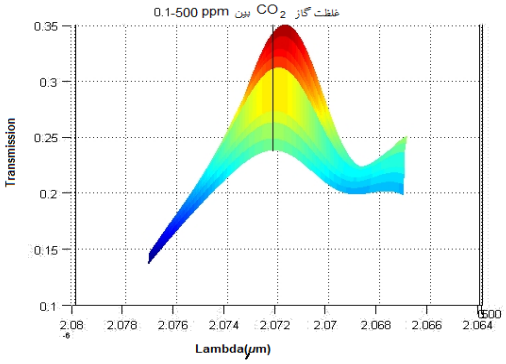
پس از انجام شبیه‌سازی در محیط نرم افزار لومریکال خروجی انتقالی برحسب تغییرات غلظت گاز بر حسب *ppm* در طول موج ۲/۰۷۲ میکرومتر، بصورت شکل (۶) خواهد بود که پس از بررسی به این نتیجه رسیدیم که برای غلظت‌های پایین از این ساختار و برای غلظت‌های بالاتر از ساختاری مشابه، ولی با طول موج متفاوت می‌توان استفاده نمود، که در شکل(۷) نشان داده شده است. در طول موج ۲/۶۷۳ میکرومتر برای غلظت‌های بالای ۲۵۰ *ppm* استفاده شده است. نهایتا برای اینکه خروجی واحدی داشته باشیم از یک ترکیب کننده (*combiner*) استفاده و خروجی‌ها را با هم جمع و تابع انتقال تمام ساختار برحسب غلظت گاز دی‌اکسیدکربن بدست آوردیم.

1-Meysson

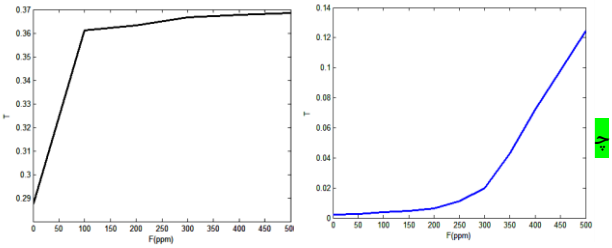
2-Mach-zehender Interferometer

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

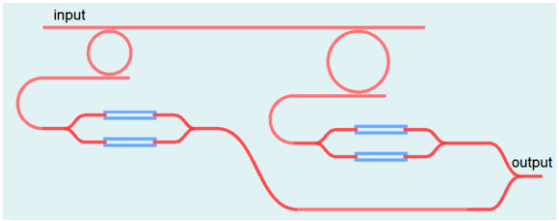
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]



شکل ۶: طیف خروجی و شیفت فرکانسی به ازای تغییرات در غلظت CO_2.



شکل ۷: شکل سمت چپ، تغییرات Transmission برحسب غلظت در طول موج ۲/۰۷۲ میکرومتر و سمت راست همین تغییرات در به ازای طول موج ۲/۶۷۳ میکرومتر.

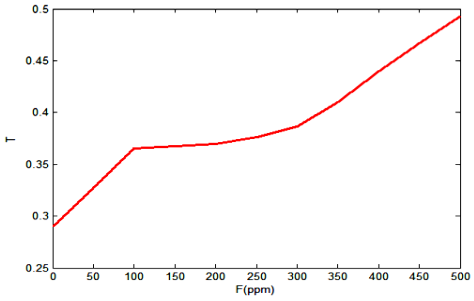


شکل ۸: ساختار یکپارچه سنسور شبیه‌سازی شده در نرم افزار لومریکال (حلقه بزرگ برای انتخاب طول موج ۲/۶۷۳ و حلقه کوچک برای انتخاب طول موج ۲/۰۷۲).

در نهایت خروجی هر دو تداخل سنج ماخ ذندر، توسط یک ترکیب کننده در خروجی با هم جمع می شود. در شکل های ۶ و ۷ و ۹، محور عمودی، نسبت دامنه خروجی به ورودی است که اندازه انتقال در ساختار را مشخص می نماید.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله از روش ورنیه برای افزایش حساسیت سنسور



شکل ۹: جمع خروجی‌های شکل(۶) و بدست آوردن خروجی واحد

گاز دی‌اکسیدکربن در غلظت‌های پایین و بالای ۲۵۰ *ppm* استفاده شد. محدوده غلظت اندازه گیری شده از ۰/۱*ppm* تا ۵۰۰*ppm* با توجه به نتایج، بدست آمده است. در اینجا به دو مقوله حساسیت و سرعت پاسخ‌گویی توجه ویژه‌ای شده است. زمان پاسخ‌گویی این سنسور کمتر از ۱ میلی ثانیه می‌باشد. به عنوان پیشنهاد، جهت افزایش حساسیت سنسور گاز دی‌اکسیدکربن می توان از یک لایه فلز طلا برروی سطح جانبی تداخل سنج ماخ ذندر استفاده نمود. این کار سبب می شود تا موج تنها درون موجبرهای تداخل سنج ماخ ذندر عبور نموده و کمترین تلفات در سطح جانبی آن مشاهده گردد. همچنین استفاده از لایه های غشایی جاذب میزان پایداری و حساسیت سنسور را افزایش خواهد داد.

مراجع

[1] Davidson, Clive. *"Marine Notice: Carbon Dioxide: Health Hazard"*, Australian Maritime Safety Authority, 7 February *2003*.

[2] Andreas Lambrianou, Soren Demin, *"Protein Engineering and Electrochemical Biosensors". Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology,2007.*

[3] Passaro, V.M.N.; Troia, B, " *A generalized approach for design of photonic gas sensors based on Vernier-effect in mid-IR. Sens".* Actuators B Chem, 2012.

[4] Sun, Y.; Fan, X. "*Optical ring resonators for biochemical and biochemical sensing*". Anal. Bioanal. Chem. 2011.

[5] Yi, H, Citrin, D.S.; Zhou, Z. "*Highly sensitive silicon micro ring sensor with sharp asymmetrical resonance*". Opt. Express 2010.

[6] See web site http://www.randombio.com/co2.html

[7] Mario La Notte, Benedetto Troia, **"***Recent Advances in Gas and Chemical Detection by Vernier Effect-Based Photonic Sensors***"**, Published: 10 March 2014

[8] La Notte M., Passaro V.M.N. "*Ultra high sensitivity chemical photonic sensing by Mach-Zehnder interferometer enhanced Vernier-effect"* ,Sens. Actuators B Chem. 2013.

[9] Dresselhaus, M. S. (1999). "*Solid State Physics Part II Optical Properties of Solids*". Course 6.732 Solid State Physics. MIT. Retrieved 2015.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]