



## افزایش حساسیت سنسورهای مبتنی بر فیبر نوری گاز دی اکسید کربن با روش ورنیه

محمد طیبی نژاد، عبدالله علیزاده، فریبرز رحیمی

بناب، انتهای بزرگراه ولایت، دانشگاه بناب، گروه مهندسی برق - الکترونیک، کد پستی ۵۵۵۱۷۶۱۱۶۷

Email: [m.taieby.nejad@gmail.com](mailto:m.taieby.nejad@gmail.com)

Email: [alizadeh@bonabu.ac.ir](mailto:alizadeh@bonabu.ac.ir)

**چکیده** - در این مقاله به طراحی و شبیه سازی سنسور گاز دی اکسید کربن جهت اندازه گیری غلظت هایی بین ۰/۱ تا ۵۰۰ ppm پرداخته شده است. اطلاعات مربوط به گاز دی اکسید کربن را در دمای ۲۹۸ درجه کلوین و فشار ۱ اتمسفر وارد نرم افزار شبیه سازی 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 دی اکسید کربن اقدام گردیده است. شبیه سازی و اخذ نتایج خروجی سنسور با استفاده از روش FDTD در محیط لومریکال انجام شده است. جهت بهینه سازی ساختار و افزایش حساسیت سنسور از دو طول موج جذب متفاوت گاز و تداخل سنج ماخ ذندر بهره گیری شده است. خروجی ها با هم ترکیب و برای ورود به قسمت آشکارساز، آماده سازی 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](mailto:m.taieby.nejad@gmail.com)

Email: [alizadeh@bonabu.ac.ir](mailto: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.

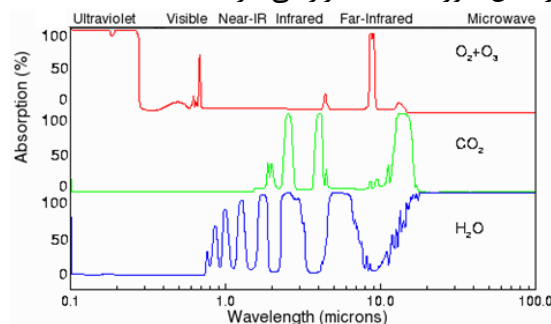
## ۱- مقدمه

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 می‌گردد و باعث می‌شود که اختلالاتی مانند کاهش میزان شنوایی بروز یابد. در غلظت‌های حدود ۸٪ باعث سردرد، تعلق، تاری دید و کاهش هوشیاری می‌گردد [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<sub>2</sub>

هر ماده‌ای دارای طیف جذب و عبور مشخصی می‌باشد که با استفاده از روش‌های طیف سنجی و اسپکتروسکوپی استخراج می‌شود 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.

$$\bar{n} = n + ik \quad (1)$$

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 می‌باشد. ضریب شکست مختلط با عدد موج  $K$  طبق فرمول زیر مرتبط است.

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

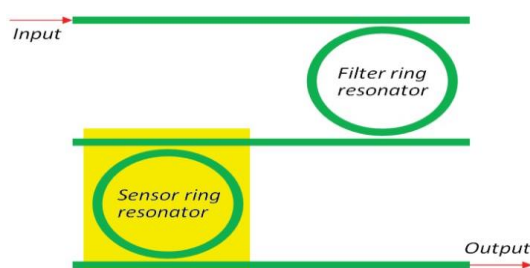
در این رابطه  $\lambda_0$  طول موج در خلاء است. با جایگذاری در معادله موج تخت، می‌توان دید که  $k$  باعث افت دامنه در انتشار نور می‌شود.

$$\begin{aligned} E(z, t) &= \text{Re}[E_0 e^{i(Kz - \omega t)}] \\ &= \text{Re}[E_0 e^{i(2\pi(n+ik)z/\lambda_0 - \omega t)}] \\ &= e^{-2\pi kz/\lambda_0} \text{Re}[E_0 e^{i(kz - \omega t)}] \end{aligned} \quad (3)$$

فرمول (۳) انتشار موج در زمان و مکان مشخص را بیان می‌کند [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 می‌رود، استفاده شده است. همان گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد از دو تشدید گر حلقوی به صورت آبشاری استفاده شده است [۵ و ۷].



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

طول موثر حلقه تعیین کننده طول موج تشدید می‌باشد، که در طول موج تشدید، نور خروجی دارای حداقل دامنه می‌باشد. موقعیت طول موج تشدید متناسب با المان اندازه گیری شونده انتخاب می‌شود. 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، می‌باشد.

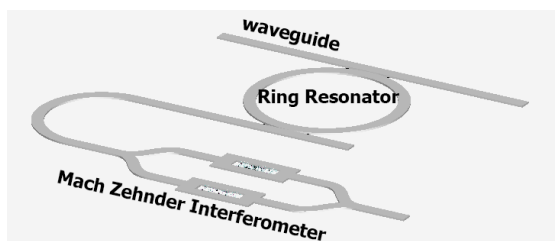
## ۳-۱- فیلتر سنسور

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

در فرمول ۶ مقادیر  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  تلفات موجبر در هریک از بازوهای تداخل سنج می باشد. باتقسیم  $E_o$  بر  $E_{in}$  به رابطه تابع انتقال در تداخل سنج ماخ ذندر بدست می آید.

$$\frac{E_o}{E_{in}} = \sqrt{\gamma_1 \gamma_2} \cdot e^{j\Delta\phi} + \sqrt{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)} \quad (۷)$$

در هریک از بازوها میزان غلظت اجزای تشکیل دهنده ی هوا کاملاً برابر می باشند و فقط در بازوی سنجش گاز دی اکسید کربن به محیط اضافه می گردد. در این صورت گاز کربن دی اکسید تنها عامل تغییر در میزان انتقال و تغییر در دامنه موج می باشد.



شکل ۵: نمونه شبیه سازی شده از سنسور گاز دی اکسید کربن.

#### ۴- نتایج شبیه سازی

پس از انجام شبیه سازی 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 غلظت های پایین از این ساختار و برای غلظت های بالاتر از ساختاری مشابه، ولی با طول موج متفاوت می توان استفاده نمود، که در شکل (۷) نشان داده شده است. در طول موج ۲/۶۷۳ میکرومتر برای غلظت های بالای ۲۵۰ ppm استفاده شده است. نهایتاً برای اینکه خروجی واحدی داشته باشیم از یک ترکیب کننده (combiner) استفاده و خروجی ها را با هم جمع و تابع انتقال تمام ساختار برحسب غلظت گاز دی اکسید کربن بدست آوردیم.

(عمل فیلتر طول موج) وارد قسمت سنجش خواهد می شود. تابع انتقال یک تشدید گر حلقوی با دو موجبر را می توان با روش قوانین میسون<sup>۱</sup> مورد مطالعه قرار داد. این روش برای مدل سازی ساختارهای پیچیده نیز مناسب است [۳].

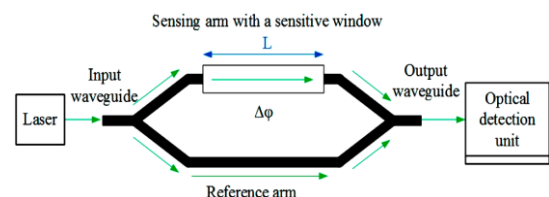
طول موج تشدید در تشدید گر حلقوی طبق رابطه (۴) می تواند محاسبه گردد [۴].

$$\lambda_0 = 2\pi \cdot r \cdot n_{eff} \cdot m \quad (۴)$$

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 گاز از تداخل سنج ماخذندر<sup>۲</sup> در خروجی ریز حلقه تشدید استفاده شده است.



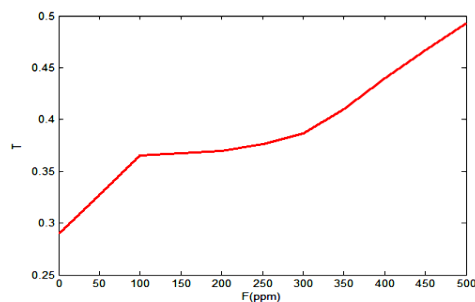
شکل ۳: تداخل سنج ماخ ذندر و مسیر عبور نور در بازوها [۸].

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

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

از فرمول زیر استفاده می گردد:

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

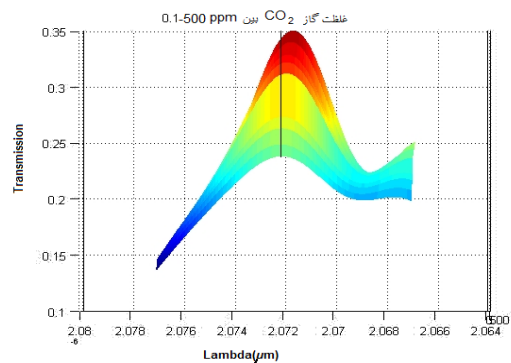


شکل ۹: جمع خروجی‌های شکل (۶) و بدست آوردن خروجی واحد

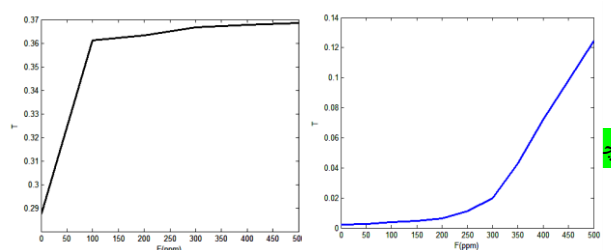
گاز دی‌اکسید کربن در غلظت‌های پایین و بالای ۲۵۰ ppm استفاده شد. محدوده غلظت اندازه‌گیری شده از ۰/۱ ppm تا ۵۰۰ ppm با توجه به نتایج، بدست آمده است. در اینجا به دو مقوله حساسیت و سرعت پاسخ‌گویی توجه ویژه‌ای شده است. زمان پاسخ‌گویی این سنسور کمتر از ۱ میلی ثانیه می‌باشد. به عنوان پیشنهاد، جهت افزایش حساسیت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

#### مراجع

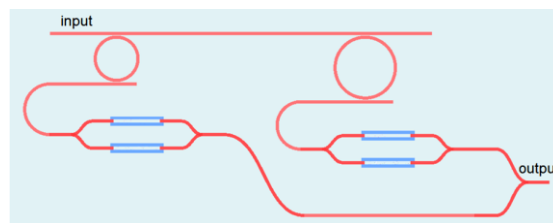
- [1] Davidson, Clive. "Marine Notice: Carbon Dioxide: Health Hazard", Australian Maritime Safety Authority, 7 February 2003.
- [2] Andreas Lambrianou, Soren Demin, "Protein Engineering and Electrochemical Biosensors". *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2007.
- [3] Passaro, V.M.N.; 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.



شکل ۶: طیف خروجی و شیف فرکانسی به ازای تغییرات در غلظت CO<sub>2</sub>.



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 می‌شود. در شکل‌های ۶ و ۷، محور عمودی، نسبت دامنه خروجی به ورودی است که اندازه انتقال در ساختار را مشخص می‌نماید.

#### ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله از روش ورنیه برای افزایش حساسیت سنسور