



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## حسگر زیستی مبتنی بر تشدیدگر لوله‌ای جفت شده عمودی با موجبر زیر طول موجی

لادن اکبری، دکتر کامبیز عابدی، دکتر کیان جعفری

دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی

چکیده - در این مقاله، عملکرد تشدیدگر لوله‌ای نوری تزویج شده به فرم عمود با موجبر اسلات با ابعاد زیر طول موج، برای کاربردهای حسگری زیستی تحلیل شده است. به علت دیواره بسیار نازک در مقیاس زیر طول موجی تشدیدگر لوله‌ای و فاصله چند نانومتری بین تشدیدگر و موجبر که از ویژگی‌های برجسته ساختار می‌باشند، هم تزویج نوری چشمگیری با نرخ انقراضی برابر ۱۱۱ دسی بل و هم در کاربردهای حسگری زیستی، حساسیتی برابر ۴۶۳ نانومتر بر واحد ضریب شکست، وضوح  $10^{-4}$  و ضریب برجستگی برابر ۶۵۲٫۲ حاصل شده است. با بررسی اثر تغییر فاصله بین موجبر و تشدیدگر، مشاهده می‌شود که بالاترین میزان حساسیت و بیشترین تغییرات نرخ انقراض برابر ۱۱٫۷۴ دسی بل در فاصله ۱۰۰ نانومتری حاصل شده است. ساختار پیشنهادی، می‌تواند برای کاربردهای فوتونیک مجتمع شده آزمایشگاه-بر روی-تراشه استفاده شود.

کلید واژه- تشدیدگرهای حلقوی، تشدیدگرهای لوله‌ای، حسگر زیستی، حسگر نوری، میکروکاوک.

## A BioSensor based on a Vertical coupled Tubular Resonator in subwavelength waveguide

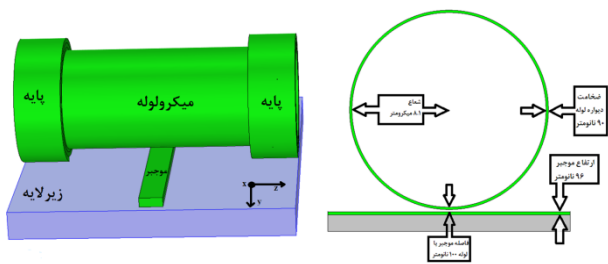
Ladan Akbari, Dr Kambiz Abedi, and Kian Jafari

Department of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University

**Abstract-** In this paper, the performance of the coupler optic resonator is analyzed in a vertical scheme with a subwavelength slot waveguide for applications of bio-sensing. Due to a subwavelength-very thin wall and a several hundred nanometer gap between the resonator and the waveguide, which is an outstanding feature of this structure, a significant optical coupling with an extinction ratio of 111 dB and in bio-sensing application, the sensitivity is 463 nm / RIU, the resolution is  $10^{-4}$  and FOM is 652.2. By considering the effect of varying the gap between the waveguide and the resonator, it is observed that the highest sensitivity and the maximum shift in the extinction ratio of 11.74 dB at 100 nm are obtained. The proposed structure can be used for integrated lab-on-chip photonic applications.

**Keywords:** Micro cavities, Photonic sensors, Ring resonators, Bio sensors, Tubular resonators .

لوله‌ای از جمله پلیمر، گالیم آرسناید، سیلیکن و ترکیباتش بکارگرفته شده‌اند، که از بین آن‌ها، سیلیکن، به جهت قابلیت ویژه‌اش در کوچک‌سازی ابعاد و در نتیجه، امکان ساخت تراشه-های کوچکتر، انتخاب مناسبتری می‌باشد [۵]. در این مقاله، ساختار سیلیکونی تحلیل و طراحی شده است که، هم ضخامت دیواره لوله-موجبر زیر میکرون و هم خواص حسگری بالاتری نسبت به نمونه‌های پیشین داشته باشد.



شکل ۱: شکل سمت راست: نمای سه بعدی طرحواره حسگر زیستی بر پایه تشدیدگر میکرولوله پیشنهادی و شکل سمت راست: برش عرضی در راستای X-Y در ناحیه ای از لوله که به موجبر تزویج شده است.

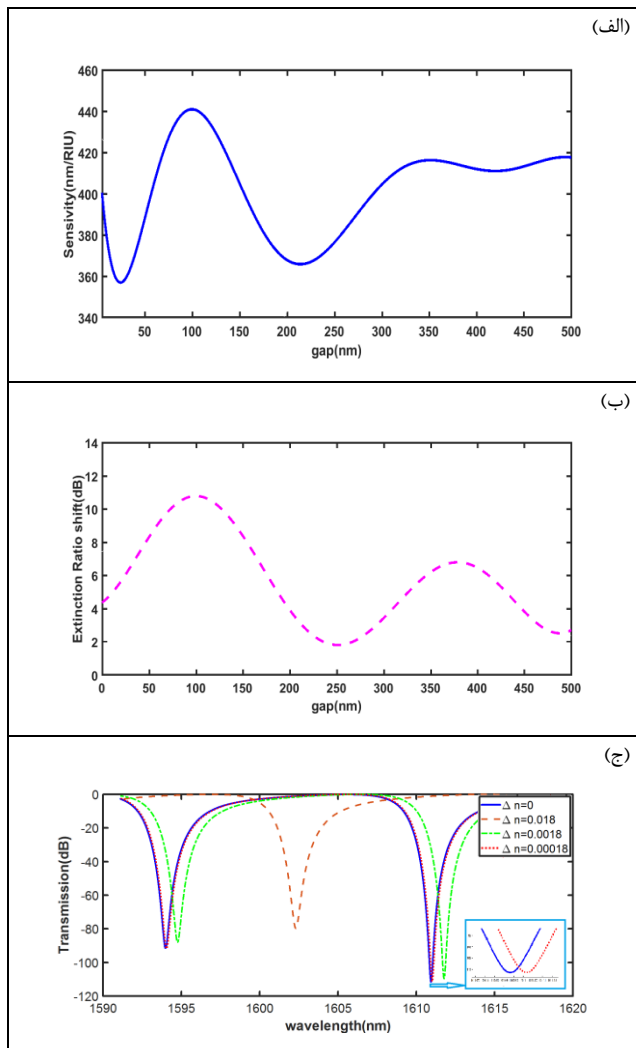
## ساختار حسگر پیشنهادی

شکل ۱ ساختار حسگر پیشنهادی را نشان می‌دهد که شامل یک تشدیدگر لوله‌ای سیلیکونی تزویج‌شده به یک موجبر اسلات سیلیکونی می‌باشد که بر روی زیر لایه دی اکسید سیلیکونی به ارتفاع ۴ میکرومتر قرار گرفته‌اند. تشدیدگر لوله‌ای، دارای شعاع داخلی ۸٫۱ میکرومتری، دیواره‌هایی هموار در شعاع با ضخامت ۹۰ نانومتر، طول ۵۰ میکرومتر می‌باشد که به طور عمودی بر روی موجبر سیلیکونی به طول ۵۰ میکرومتر، عرض ۴۰۰ و ارتفاع ۹۶ نانومتر قرار گرفته است. عرض ۴۰۰ نانومتری موجبر مقابل میکرولوله، در فاصله ۱۰۰ نانومتری از لوله که با استفاده از دو پایه با قطر بزرگتر از لوله، در ابتدا و انتهای لوله ایجاد شده است، می‌باشد. با اعمال نور از یک سمت موجبر، نور در موجبر منتشر شده و به تشدیدگر تزویج می‌شود. طول موج تشدید برابر  $\lambda_{res} = n_{eff} \frac{L}{m}$  است که در آن m عدد صحیح و نمایانگر تعداد مودها،  $n_{eff}$  ضریب شکست موثر مود انتشار و L طول محیط سطح مقطع حلقوی لوله به شعاع R که برابر  $2\pi R$  هست، می‌باشد. ضریب کیفیت که رابطه مستقیم با فرکانس تشدید دارد، از نسبت فرکانس زاویه‌ای بر پهنای باند

## مقدمه

حسگرهای زیستی به عنوان افزاهای تحلیلگر زیستی، با قابلیت تشخیص تغییرات حاصل از حضور ماده زیستی در محیط اطرافمان، در سال‌های اخیر، مورد توجه تحقیقات بسیاری قرار گرفته‌اند. تحقیقات علمی و عملی بسیاری در زمینه بهبود پارامترهای عملکرد مشخصات حسگرهای زیستی نظیر افزایش حساسیت، قابلیت اطمینان، کاهش قیمت، سهولت در فرآیند تولید، کاهش ابعاد و مجتمع سازی حسگرهای زیستی نوری صورت گرفته‌اند و این تحقیقات همچنان ادامه دارند. اساس عملکرد حسگرهای زیستی نوری، بر مبنای میزان برهم‌کنش نور با ماده زیستی است که سنجش این برهم‌کنش، از طریق بررسی رفتار نمودار طیف انتقالی نور بر حسب طول موج، صورت می‌پذیرد. هر چه میزان این برهم‌کنش بیشتر باشد، پارامترهای حسگری نظیر حساسیت و وضوح حسگری بهبود خواهند یافت. یکی از راهکارهای افزایش برهم‌کنش نور-ماده، افزایش طول مسیر نوری منتشرشده در ساختار می‌باشد که با بکارگیری تشدیدگرهای نوری دی‌الکتریک حلقوی این امر میسر می‌شود. زیرا تشدید انجام شده در تشدیدگرهای نوری حلقوی موجب افزایش طول مسیر نوری و در نتیجه افزایش ضریب کیفیت می‌شود. همچنین به دلیل قابلیت کوچک‌شدن، سهولت در فرآیند ساخت، قابلیت حمل آسان، پایداری مکانیکی و سازگاری با فوتونیک مجتمع‌شده، این تشدیدگرها به عنوان انتخاب مناسبی برای برای کاربردهای حسگری زیستی می‌باشند. با توجه به هندسه‌های متنوع موجود برای تشدیدگرهای حلقوی، حسگرهای زیستی مبتنی بر این هندسه‌ها شامل کره-ها، ترویدها، حلقه‌ها و لوله‌ها ساخته شده‌اند. نسبت به انواع دیگر، حسگرهای تشدیدگر لوله‌ای، به جهت دارا بودن ویژگی-هایی نظیر فرآیند ساخت ساده‌تر، مجتمع‌سازی یکپارچه، هندسه سه بعدی با امکان تحدید نوری سه بعدی خارج طرحی در لایه‌های فوتونیک انباشته شده و هسته توخالی که به طور همزمان امکان بکارگیری آن به عنوان کانال سیال و تشخیص-دهنده تغییرات ضریب شکست، مورد توجه تحقیقات قرار گرفته‌اند [۴-۱]. مواد مختلفی برای ساخت حسگرهای تشدیدگر

رخ داده‌اند که به ترتیب برابر ۴۶۳ نانومتر بر واحد ضریب شکست و ۱۲،۲۷ دسی بل هستند.



شکل ۲: الف-منحنی حساسیت، ب-منحنی  $\Delta ER$  بر حسب تغییر در فاصله، ج- منحنی عبوری بر حسب طول موج که نمودار آبی بدون اعمال تغییرات ضریب شکست و منحنی خط چین قرمز با اعمال  $\Delta n = 0.018$ ، سبز با اعمال  $\Delta n = 0.0018$  و قرمز  $\Delta n = 0.00018$

در فاصله محاسبه شده برای حالت بیشینه پارامترهای حسگری، نمودار عبور نوری بر حسب طول موج در شکل ۲-ج برای تغییرات ضرایب شکست صفر با رنگ آبی، برای ۰،۰۱۸ با رنگ نارنجی و خطچین، برای ۰،۰۰۱۸ با رنگ سبز و نقطه-خط و برای ۰،۰۰۰۱۸ با رنگ قرمز و دونقطه ارائه شده است. بزرگنمایی برای  $\Delta n$  های صفر و ۰،۰۰۰۱۸ در کادر فیروزه‌ای رنگ گوشه پایین سمت راست شکل ۲-ج، نشان دهنده کمترین میزان تغییرات ضریب شکست قابل سنجش و پارامتر وضوح حسگری حدود  $10^{-4}$  می‌باشد. حسگر پیشنهادی طول

تشدیدگر حاصل می‌شود. از طریق سنجش میزان تغییرات طول موج تشدید<sup>۱</sup> در طیف عبوری، می‌توان به میزان تغییرات ضریب شکست حاصل از حضور ماده در داخل لوله پی برد، که مکانیسم عملکرد حسگرهای زیستی مبتنی بر تشدیدگرهای لوله‌ای بر همین اساس می‌باشد. نسبت  $\Delta \lambda_{res}$  بر تغییرات ضریب شکست ( $\Delta n$ )، پارامتر حساسیت حسگری<sup>۲</sup> با واحد نانومتر بر واحد ضریب شکست را ارائه می‌نماید.

## نتایج شبیه‌سازی

پاسخ نوری و نمودار طیف عبوری حسگر پیشنهادی شکل ۱، برای موج تابشی با قطبش TE، با استفاده از روش FDTD و تحلیل سه بعدی، در نرم افزار لومریکال محاسبه شده‌است. به منظور یافتن مشخصات بهتر حسگرها و صرفه جویی در زمان و هزینه، قبل از فرآیند ساخت و مجتمع سازی، انجام محاسبات تئوری و شبیه سازی ساختارها شرایط ضروری می‌باشند. با هدف یافتن حسگر مناسب، فاصله تزویج مناسب بین موجبر، به طوری که در آن فاصله، ساختار دارای مشخصه‌های حسگری مناسبی باشد، تاثیر تغییر فاصله تزویج بین موجبر و لوله بر حسب حساسیت نسبت به ضریب شکست و قدرمطلق تغییرات نرخ انقراض<sup>۳</sup> در فاصله‌هایی از ۵ تا ۵۰۰ نانومتر، به ازای تغییرات ضریب شکست برابر ۰،۰۱۸، در فضای داخلی لوله به ترتیب در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب، ارائه شده‌اند. با تغییر فاصله تزویج بین موجبر و لوله  $\Delta ER$ ، مقادیر مثبت، صفر و منفی برای  $\Delta ER$  حاصل می‌شوند، زیرا این فاصله، تاثیر مستقیم بر ضریب تزویج و ER دارد که بیانگر کوک‌پذیری ساختار حسگر نسبت به فاصله تزویج، کوک‌پذیر می‌باشد. در شکل ۲-ب، برای یافتن فاصله‌ای با بیشینه مقدار  $\Delta ER$ ، قدر مطلق  $\Delta ER$  محاسبه شده‌است. در دو شکل، مشاهده می‌شود که هم بیشینه میزان حساسیت و هم بیشینه  $\Delta ER$  در فاصله ۱۰۰ نانومتری،

1 Resonance wavelength shift ( $\Delta \lambda_{res}$ )

2 Sensivity (S) = nm/RIU

3 Extinction Ratio shift ( $\Delta ER$ )

## نتیجه گیری

در این مقاله، حسگر زیستی مبتنی بر تشدیدگر لوله‌ای با ضخامت دیواره بسیار نازک زیر میکرون در تزویج با موجبری با ابعاد زیر طول موج، تحلیل و طراحی شد. بررسی اثر تغییر فاصله تزویج بین لوله و موجبر بر روی حساسیت و  $\Delta ER$  که جزو مشخصه‌های حسگری می‌باشند، نشان داد که در فاصله ۱۰۰ نانومتری، هم بیشینه حساسیت حدود ۴۶۳ نانومتر بر واحد ضریب شکست و هم بیشینه  $\Delta ER$  حدود ۱۱،۷۴ دسی بل حاصل شد. همچنین دیواره بسیار نازک در مقیاس زیر طول موجی لوله در مجاورت با فاصله ۱۰۰ نانومتری، تزویج نوری چشمگیری با نرخ انقراض ۱۱۱ دسی بل، وضوح  $10^{-4}$  و FOM برابر ۶۵۲،۲ نشان داد. ساختار حسگر پیشنهادی، علاوه بر با دارا بودن مشخصه‌های حسگری بهبود یافته، به جهت دارا بودن هسته توخالی به عنوان کانال سیال، می‌تواند برای کاربردهای سیال نوری و فوتونیکی مجتمع شده آزمایشگاه-بر روی-تراشه استفاده شود.

## مرجع ها

- [1] C.P.K. Manchee, V. Zamora, J.W. Silverstone, J.G.C. Veinot, A. Meldrum, Opt. Express, Vol 19, No.22, 2011.
- [2] M. Sumetsky, R. S. Windeler, Y. Dulashko and X. Fan, "Optical liquid ring resonator Sensor", Opt. Express, 2007,15, 14376.
- [3] A. Madani, S. M. Harazim, V. A. Quinones, A. Finn, "Optical microtube cavities monolithically integrated on photonic chips for optofluidic sensing", Opt. Lett., Vol. 42, No. 3, 2017.
- [4] Y. Li, Y. Fang, J. Wang, and Y. Mie, "Integrative Optofluidic Microcavity with Tubular channels via two-2013.photon polymerization", R.S. Chemistry. Vol.1, 2013.
- [5] W. Bogaerts, Peter Heyn, Thomas Vaerenbergh, K. Vos, S. Kumar, "Silicon microring resonators", Laser Photonics Rev. Vol.6, No. 1, pp.47-73, 2012.
- [6] C. Ciminelli, F. Dellolio, D. Conteduca, C. M. Armeniese, "High Performance SOI microring Resonator for Biochemical Sensing", Optics & Laser Technology, Vol. 59. Pp. 60- 67, 2014.

موج‌های تشدید برابر ۱۶۱۰،۹۳ و ۱۵۹۳،۹۸ نانومتر بوده که به ترتیب دارای نرخ‌های انقراضی برابر ۱۱۱،۴۴- و ۹۱،۴۵- دسی بل و ضریب کیفیتی برابر ۹۷۰۰ و ۹۶۶۰ هستند. مقدار FSR برابر ۱۷،۴۶ نانومتر می‌باشد. با اعمال  $\Delta n$  برابر ۰،۰۱۸ که معادل اعمال تغییرات ضریب شکست حاصل از وجود ۱۶۰ گرم/لیتر گلوکز محلول در آب در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر است [۶]، طول موج از ۱۵۹۳،۹۸ به ۱۶۰۲،۳ نانومتر جابجا شده، نرخ انقراض برابر ۷۹،۷۱- دسی بل و ضریب کیفیت برابر ۷۸۱۶ حاصل می‌شود. بیشینه حساسیت برای  $\lambda_{res}$   $\Delta$  برابر ۸،۳۲، ۴۶۳ نانومتر بر واحد ضریب شکست و بیشینه  $\Delta ER$  برابر ۱۱،۷۴ دسی بل حاصل شده است. برای حسگر پیشنهادی یک ضریب برجستگی مطابق با رابطه  $FOM = \frac{\Delta ER}{\Delta n}$  برابر ۶۵۲،۲ دسی بل حاصل می‌شود.

جدول ۱: مقایسه بین نتایج حاصل از حسگر پیشنهادی و کارهای مشابه

| مراجع     | ماده  | شعاع و ضخامت دیواره ( $\mu m$ ) | حساسیت nm/RI U | $\Delta ER$ (dB), FOM |
|-----------|-------|---------------------------------|----------------|-----------------------|
| [۲]       | Si    | ۱۰۶<br>۱۳                       | ۸۰۰            | ۱،۵<br>۳،۴۹           |
| [۳]       | Tio2  | ۱۰<br>۰،۲۴۵                     | ۱۴۰            | ۲۳<br>۱۷،۳            |
| [۴]       | پلیمر | ۱۲،۵<br>۰،۵                     | ۳۹۰            | ۱۰،۳<br>۲۶،۸۴         |
| این مقاله | Si    | ۸،۱<br>۰،۰۹                     | ۴۶۳            | ۱۱،۷۴<br>۶۵۲،۲        |

جدول ۱ مقایسه بین ساختارهای مشابه و ساختار پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از این مقاله، به نسبت کارهای مشابه، بهبود قابل ملاحظه ای را هم در حساسیت، هم  $\Delta ER$ ، FOM و هم در ابعاد ارائه نموده است.