حسگر زیستی نوری مبتنی بر میکروحلقه‌هایی با ساختار فرود/فزود

لادن اکبری، دکتر کامبیز عابدی

دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی

*نویسنده مسئول: k_abedi@sbu.ac.ir

چکیده – در این مقاله، سه ساختار مبتنی بر میکرو تشدیدگرهای نوری حلقه‌ای پلیمری برای حسگرهای زیستی نوری، مورد بررسی قرار گرفته اند که مشتمل بر دو موجبر مزدوج به یک، دو و سه تشدیدگر حلقه‌ای با پلتفرم فرود/فزود می‌باشند. حساسیت کل سطح حسگر، برای ساختار اول با یک تشدیدگر حلقه‌ای به شعاع ۵ میکرومتر، برابر *nm/RIU* ۱۷۰ ، برای ساختار دوم با دو حلقه تودرتو مزدوج ، برابر *nm/RIU* ۱۵۳ و حساسیت ساختار سوم با سه حلقه *nm/RIU* ۱۴۶ محاسبه شده اند. نسبت به چینش های مشابه برای حسگرها، در ساختارهای پیشنهادی، علاوه بر ابعاد کوچک‌تر ، حساسیت نسبت به کل سطح و حساسیت نسبت به سطح داخلی حلقه بالاتری ارایه شده‌اند. همچنین توانایی سنجش ذره زیستی خاص و بهبود در انتخاب‌پذیری، از طریق بررسی عملکرد حسگری تحت تاثیر پوشاندن سطح کوچکترین حلقه ساختار ۲ و۳ با لایه پذیرنده آنالیت خاص، از دیگر ویژگی‌های حسگرهای پیشنهادی می‌باشند.

کلید واژه- حسگر زیستی، حسگر نوری، میکرو حلقه، میکرو حلقه مزدوج.

The Optical Biosensor based on microrings with Add- Drop Structure

Ladan Akbari , and Dr Kambiz Abedi

Department of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University

Abstract- In this work, three structures based on optical polymer micro-ring resonators for optical bio-sensors have been investigated that consist of two coupled straight waveguides to one, two, and three Add- Drop micro-ring resonators. The sensitivity of the purposed sensor for the first structure with a ring resonator with a radius of 5 μm is 170 nm / RIU for the second structure with two coupled rings, equal to 153 nm / RIU and the sensitivity of the third structure with three coupled rings 146 nm / RIU are calculated. In comparison with similar configurations for biosensors, in proposed structures, in addition to smaller size, sensitivity to the whole surface and sensitivity to the inner surface of the loop are presented. Also, the capability to measure specific bioparticles and enhanced in selectivity are another feature of the proposed sensors by considering the sensing function of the effect of covering the surface of the smallest structural coupled rings 2 and 3 with the particular analyte acceptor layer.

Keywords: Biosensor, Coupled microrings, Microring, Optical sensor.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

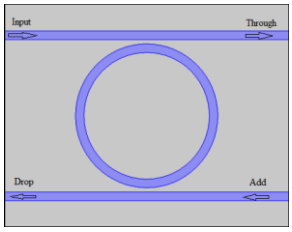
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

حسگرهای زیستی مبتنی بر تشدیدگرهای حلقه نوری به عنوان یک ابزار تحلیلگری زیستی، به علت دارا بودن خواص ویژه، امکان کوچک‌سازی ابعاد و توانایی در تشخیص تغییر پارامترهای تشدیدی در اثر تغییرات ایجاد شده در خواص مواد و شکل هندسی میکرو حلقه‌ها، به عنوان افزاره‌هایی با قابلیت تشخیص اطلاعات کمّی ذرات زیستی ، در سال‌های اخیر، مورد توجه تحقیقات بسیاری قرار گرفته‌اند[۱-۲]. تلاش در زمینه بهبود پارامترهای عملکرد و مشخصات حسگرهای زیستی نظیر افزیش حساسیت، آسان سازی قابلیت حمل(portable)، بالا بردن قابلیت اطمینان، افزایش سرعت پاسخ، افزایش ایمنی تداخلی، سهولت در فرآیند تولید، کاهش ابعاد و کاهش قیمت صورت گرفته‌اند و این تلاش‌ها همچنان ادامه دارند. مواد مختلفی از جمله سیلیکن و پلیمر در ساخت این حسگرها بکارگرفته شده‌اند، اما بکارگیری پلیمرها نه تنها باعث کاهش یافتن هزینه‌ها[۳]، ارایه خواص نوری، الکتریکی، مغناطیسی و حرارتی ویژه‌ای شده، بلکه ماتریس‌های پلیمری به عنوان مواد جاذب و بسیار سازگار ذرات زیستی مانند آنزیم‌ها و آنتی‌بادی‌ها عمل می‌نمایند. در این مقاله، ساختار تک حلقه، دو و سه ساختار حلقه کوپل شده به هم از لبه داخلی، برای حسگرهای زیستی میکروکاواک‌های حلقوی پلیمری با پلتفرم فرود/فزود ارایه شده است، که هم دارای ابعاد کوچکی با شعاعی کمتر از ۵ میکرومتر بوده و هم دارای خواص حساسیت حسگری بالکی بالایی نسبت به نمونه های ارایه شده پیشین می‌باشد.

۲- سازوکار عملکرد حسگر زیستی مبتنی بر میکروکاواک‌های حلقوی

میکروکاواک‌های حلقوی به علت دارا بودن تشدیدهای-های تیز در مشخصه طیف عبوریشان، کاندیداهای مناسبی برای کاربردهای حسگرهای زیستی نوری می-باشند. ساختار حسگرهای زیستی نوری مبتنی بر میکروکاواک‌ها مطابق شکل ۱، شامل یک موجبر نوری حلقه‌ای و حداقل یک موجبر مستقیم مزدوج (coupled) به حلقه، می‌باشند، به طوری که وقتی موج نور از ورودی یک موجبر مستقیم، وارد ساختار می-شود، این نور در ساختار منتشر شده و از طریق موج ناپایدار(evanescence wave) به کاواک حلقوی تزویج می‌شود. هنگامی که شیفت فاز رفت و برگشت نور (round- trip)، مضرب صحیحی از 2π و برابر $2\pi m$ باشد، موج‌ها دارای تداخل سازنده بوده و در کاواک تشدید رخ می‌دهد .



شکل ۱: ساختار طرح ۱ پیشنهادی برای حسگرهای زیستی نوری مبتنی بر میکروکاواک با ساختار یک حلقه با دو موجبر با پلتفرم فرود/فزود، که ناحیه آبی رنگ موجبر پلیمر و ناحیه خاکستری محیط بالک می‌باشد.

طول موج تشدید در معادله (۱) ارایه شده است[۴].

$$\lambda_{res} = n_{eff} \frac{L}{m} \qquad (۱)$$

که در آن m عدد صحیح و نمایانگر تعداد مودها، L محیط کاواک حلقوی و n_{eff} ضریب شکست موثر مود انتشار می‌باشند. از معادله (۱) درمی‌یابیم که طول موج تشدید شدیدا وابسته به طول موج موثر می‌باشد، از طرفی، حضور مولکول‌های زیستی، موجب ایجاد تغییراتی در ضریب شکست موثر می‌شوند، بنابراین از طریق سنجش میزان تغییرات طول موج تشدید ($\Delta\lambda_{res}$) در طیف عبوری، می‌توان میزان مولکول‌های زیستی را اندازه‌گیری نمود، که مکانیسم عملکرد حسگرهای زیستی مبتنی بر میکروکاواک‌های حلقوی بر همین اساس می‌باشند.

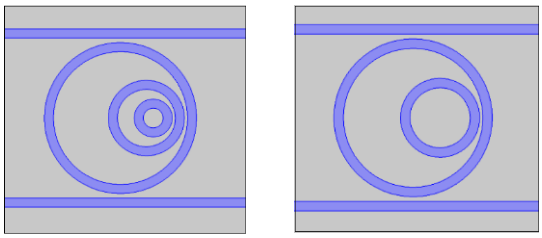
۳- ساختارهای پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله، سه ساختار برای حسگرهای زیستی نوری مشتمل بر یک حلقه، دو حلقه تزویج شده از لبه داخلی و سه حلقه مزدوج، به طوری که حلقه بزرگتر به دو موجبر فرود/فزود تزویج باشد، به ترتیب در شکل‌های۱، ۲-(راست)و ۲-(چپ) ارایه شده‌اند. در هر سه ساختار

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

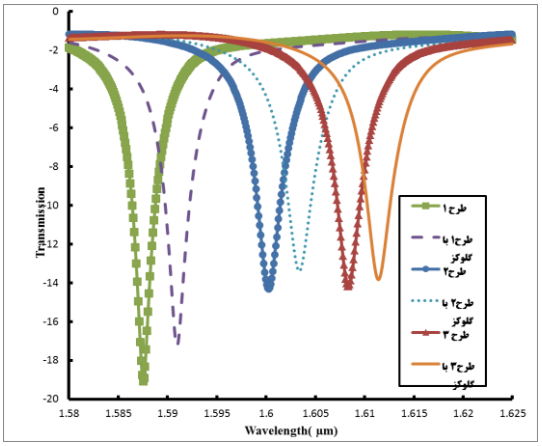
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

شکل‌های ۱ و ۲، شعاع بیرونی‌ترین حلقه برابر ۵میکرومتر، پهنا و ضخامت همه حلقه‌ها یکسان و برابر با پهنا و ضخامت موجبرهای مستقیم بوده که مقادیرشان به ترتیب برابر ۰.۶ و ۰.۱میکرومتر برای تک مود بودن، فاصله بین موجبر مستقیم از هر حلقه در ساختار شکل ۱ برابر ۰.۳میکرومتردر نظر گرفته و فاصله حلقه ها از هم ۰.۱ میکرومتر فرض شده‌اند. شعاع حلقه ۲ و ۳ به ترتیب نصف و ۰.۲۵ شعاع حلقه بزرگتر می‌باشند. موجبر مستقیم و حلقه هر دو از جنس پلیمری می‌باشند که ضریب شکست موثر برای ساختار تک حلقه شکل ۱ برابر ۱.۵۱ فرض شده‌اند. کلیه شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار Comsol انجام شده و محاسبه ماتریس عبوری در خروجی Through برای قطبش TE صورت‌پذیرفته‌اند.



شکل ۲: ساختارهای پیشنهادی برای حسگرهای زیستی نوری مبتنی بر میکروکاواک حلقه‌ای فرود/فزود، (راست) طرح۲: دو حلقه مزدوج (چپ) طرح۳: سه حلقه مزدوج از لبه داخلی که حلقه شماره ۲ و ۳ به ترتیب دارای نصف و ۰.۲۵ شعاع حلقه شماره ۱ هستند که شعاع آن ۵ میکرومتر می‌باشد.

در شکل ۳ طیف عبوری بر حسب طول موج، برای سه طرح پیشنهادی طرح‌های ۱، ۲ و ۳ در حضور و بدون حضور گلوکز ارایه شده‌اند، به طوری که مقادیر افت سه طرح در منحنی‌های عبوریشان به ترتیب برابر ۱۹.۰۸۱۲-، ۱۴.۳۱۰- و ۱۴.۱۹۶- بر حسب dB در طول موج‌های تشدید ۱.۵۸۷۵۳، ۱.۶۰۰۲۷و ۱.۶۰۸۴ میکرومتر می‌باشند. مشاهده می‌شود که طرح ۱ با FSR برابر ۵۳ نانومتری، در مقایسه با طرح‌های ۲ و ۳، بالاترین مقدار افت و نرخ خاموشی Extinction (Ratio(ER)) را ارایه نموده است. زیرا در دو طرح ۲و ۳، تزویج نمودن حلقه‌هایی به شعاع‌های ۲.۵ و ۱.۲۵ میکرومتر به لبه داخلی حلقه بزرگتر ۵میکرومتری، موجب ایجاد تلفات و در نتیجه کاهش ER در نمودار عبوریشان می‌شوند.



شکل ۳: منحنی عبوری بر حسب طول موج طرح‌های۱، ۲ و۳ بدون گلوکز با نشانگر و با گلوکز با نقطه چین و خط

جهت بررسی اثرات حسگری هر سه ساختار، ترکیب گلوکز(ذره زیستی نمونه) محلول در آب با غلظت گلوکز ۱۲۰ گرم بر لیتر، به محیط بالک وارد می‌شود. در طول موج ۱.۵۵ میکرومتر، ضریب شکست موثر ترکیب ذکر شده، برابر ۱.۳۲۴۴ و ضریب شکست آب برابر ۱.۳۱۰ گزارش شده است[۵]. سنجش میزان گلوکز، از طریق سنجش نسبت جابجایی طول موج تشدید در نمودار Through بر تغییرات ضریب شکست حاصله از حضور گلوکز،که این نسبت معرف پارامتر حساسیت بالکی حسگری می‌باشد، صورت می‌گیرد. با استفاده از نمودارهای ارایه شده در شکل ۳، می‌توان حساسیت و دیگر پارامترهای حسگری را سنجید. نسبت تغییرات ER به تغییرات ضریب شکست بیانگر شاخص برجستگی (FOM) به عنوان پارامتر حسگری، می‌باشد. در طرح ۱، مقادیر ER، تغییرات ER و FOM، به ترتیب برابر ۱۷.۸dB، ۱.۸۴dBو ۹۲ dB/RIU بدست آمده‌اند که در مقایسه با مقادیر تغییرات ER و FOM در طرح های ۲ به ترتیب برابر ۰.۹۲dB و ۴۶ dB/RIU و در طرح ۳ برابر ۰.۳۷dB و ۱۸.۵ dB/RIU ، دارای مقادیر بالاتری می‌باشند. در جدول ۱، جهت انجام مقایسه، میزان حساسیت بالک ساختارهای ارایه شده در مقالات پیشین، طرح‌های ۱، ۲ و ۳ ارایه شده‌اند. مشاهده می‌نماییم که طرح ۱ پیشنهادی، نسبت به کلیه مراجع [۲-۳، ۵-۶] و طرح‌های ۲و ۳ ،علاوه بر دارا بودن کوچکترین ابعاد، دارای مقادیر بالایی از حساسیت و FOM نیز می‌باشد. طرح ۲ و ۳ نیز حساسیت بالاتری از ساختارهای مراجع [۲-۳، ۵-

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۶]ارایه می‌نمایند، زیرا در کاربردهای حسگری زیستی نوری، بکارگیری حلقه‌های تزویج مطابق طرح‌های ۲ و ۳ علاوه بر افزایش سطح حسگری و افزایش حساسیت حسگری در اثر افزایش تلفات ناشی از تزویج، موجب فراهم آوردن امکان سنجش ذرات زیستی در ابعاد کوچکتری به شعاع ۱.۲۵ میکرومتر می‌شود.

جدول ۱: مشخصات حسگرهای زیستی حلقوی نوری

مراجع	ساختار/مواد	شعاع حلقه(μm)	حساسیت nm/RIU
[۳]	حلقه/پلیمر	۳۵۰	۵۰
[۲]	حلقه /SOI	۶۰	۱۳۰
[۵]	حلقهفرود/فزود/ SOI	۵	۱۲۰
[۶]	حلقه / Lithium niobate On Insulator	۱۰حلقه بیرونی-۵حلقه داخلی	۶۸
طرح ۱ مقاله	حلقه/پلیمر	۵	۱۷۰.۵۵
طرح ۲ مقاله	حلقه/پلیمر	۵حلقه بیرونی- ۲.۵حلقه داخلی	۱۵۳
طرح ۳مقاله	حلقه/پلیمر	۵حلقه بیرونی- ۲.۵ و ۱.۲۵حلقه داخلی‌تر	۱۴۶

در هر سه طرح پیشنهادی، می‌توان، به جای وارد نمودن گلوکز در کل فضای بالک، تنها گلوکز را داخل حلقه وارد نمود و حساسیت را در ناحیه‌ای کوچکتر سنجید به طوری که طرح۱ پیشنهادی، به گلوکز وارد شده در تنها در ناحیه داخلی حلقه ۵ میکرومتری، حساسیتی برابر nm/RIU ۲۸.۸ ارایه می‌نماید، که این میزان، ۲۳درصد نسبت به حساسیت nm/RIU ۱۲.۵ مرجع [۵]، بهبود یافته است. همچنین امکان سنجش گلوکز در سطح های کوچکتر از حلقه ۵ میکرومتری طرح ۱، از طریق حلقه‌های تزویج شده داخلی با شعاع های ۲.۵ و ۱.۲۵ میکرومتری طرح‌های ۲ و ۳میسر می‌شود، به طوری که حساسیت ناحیه داخلی حلقهμm ۲.۵ طرح ۲، برابرnm/RIU ۵ می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

تشدیدگرهای حلقه نوری، به دلیل دارا بودن حساسیت بالا و فرآیند ساخت آسان، برای ساخت حسگرهای زیستی، کاندیداهای بسیار مناسبی می‌باشند. در این مقاله، ۳ساختار با ویژگی‌های منحصربفردی برای حسگرهای زیستی حلقوی مزدوج ارایه شد. به طوری که ساختارهای مذکور، علاوه بر دارا بودن ابعاد کم حدود μm۵، FSR حدود ۵۳ نانومتر و حساسیت بالا حدودnm/RIU ۱۷۰ برای تک حلقه و نسبت به سایر ساختارها، هم قادر به سنجش انواع مشخصی از ذره-های زیستی و هم قادر به سنجش پارامترهای حسگری در مساحت کوچکتر و در ناحیه داخلی حلقه می‌باشند. در مقایسه با ساختارهای پیشین، علاوه بر اینکه ابعاد ساختار ۷۰ درصد کاهش یافته، بلکه در حساسیت بالکی ساختارهای تک حلقه و چندحلقه به ترتیب، بهبود ۳۰ و ۴۴ درصدی حاصل شده است. نصب پذیرنده یا لیگاند بر روی سطح حلقه ، جهت سنجش ذره زیستی خاص، هم موجب بهبود انتخاب‌پذیری (selectivity) حسگر در محلول‌های حاوی چند ذره شده و هم با نصب لیگاندهای حساس به مواد مختلف بر روی سطح هر یک از حلقه های مزدوج طرح‌های ۲ و ۳، امکان تشخیص چند آنالیت مختلف توسط یک حسگر، فراهم می‌شود. همچنین سنجش در سطح داخلی حلقه، موجب بهبود ۲۳ درصدی در حساسیت، ساده سازی فرآیند ساخت وجلوگیری از نصب کانال-های میکروسیال بر بالای کاواک می‌شود. بنابر مشخصات مطلوب ارائه شده، هر سه طرح، برای کاربردهای حسگرهای زیستی مناسب می‌باشند.

مراجع

[1] A. N. Nordin, "Optical Resonator Based Biosensing systems: current status and future prospects," Nanobiosensors in Disease Diagnosis, Vol. 5, pp. 41-50, 2016.

[2] A. Yalcin, K. C. Popat, J. C. Aldridge, T. A. Desai, And et at all, "Optical Sensing of Biomolecules Using Microring Resonators," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 12, Issue: 1, Jan.-Feb. 2006.

[3] L .Wang, V Kodeck, and et at all, "A Low Cost Photonic Biosensor Built on A Polymer Platform," Proc. SPIE, 2011.

[4] W. Bogaerts, P. D. Heyn, T. V.Vaerenbergh, et al.,"Silicon microring resonators,"Laser Photonics Rev. 6, No. 1, 47–73 (2012) / DOI 10.1002/lpor.201100017

[5] 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.

[6] S. Naznin, and S. M. Sher, "Design og a litium niobate on Insulator Based Optical Microring Resonator for Biosensing applications," Opt. Eng. Vol.55, No. 8, 2016.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]