



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Type of Article (e.g. Research Article)

Investigating the Effects of Increasing the Optical Path Length on the Optical Response of a Whispering Gallery Mode-Based Micro-Disk Resonator by Using Curved Waveguides

Fatemeh Aghaei ^{a,*}, Saeed Golmohammadi ^a, Hamid Bahador ^b, and Hadi Soofi ^a

^a Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b Department of Electrical and Computer Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received:

Revised:

Accepted:

Keywords:

Whispering-Gallery-Mode;
Resonator;
Curved waveguide;
Micro-disk..

ABSTRACT

Nowadays, biosensors based on whispering gallery mode play a special role in optical sensors due to their simple theory and suitable optical response for single-molecule and single-virus detection. In the meantime, micro-disk resonators have received attention because of their low fabrication cost, high selectivity, and accuracy. In this work, we study the effects of the waveguide's shape and curvature on the micro-disk sensor's optical response based on whispering waves. The distance between waveguide and resonator effects on the sensor parameters has been investigated. Finally, the most suitable distance has been selected for the sensor's optimal performance. By improving the structure, the sensitivity for the first and second modes with a 180° curve to 50 nm/RIU and 52 nm/RIU and a 90° curve to 47nm/RIU and 48nm/RIU, respectively. The simulation results show that the greater the curvature of the waveguide, the longer the optical path length. Also, the sensor's performance is improved. This sensor can be used to detect single molecular particles in the medical and environmental fields.

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: fatemeh.aghaei@tabrizu.ac.ir

How to cite this article:

نوع مقاله (مقاله علمی-پژوهشی)

بررسی اثرات افزایش طول مسیر نوری با موجبرهای خمیده بر روی پاسخ نوری تشدیدکننده میکرو دیسکی مبتنی بر موج‌های نجوایی

فاطمه آقائی^{۱*}، سعید گل محمدی^۲، حمید بهادر^۳ و هادی صوفی^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	امروزه حسگرهای زیستی مبتنی بر موج‌های نجوایی به سبب تئوری ساده و پاسخ نوری مناسب جهت شناسایی تک مولکولی و تک ویروسی، جایگاه ویژه‌ای در حوزه حسگرهای نوری دارند. در این بین، تشدیدکننده‌های میکرو دیسکی به سبب هزینه ساخت پایین و همچنین انتخابگری و دقت بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، به بررسی اثرات شکل و انحنای موجبر بر روی پاسخ نوری حسگر میکرو دیسکی مبتنی بر موج‌های نجوایی پرداخته شده است. اثرات فاصله‌ی موجبر و تشدید کننده بر روی معیارهای حسگر بررسی شده است، که در نهایت مناسب‌ترین فاصله جهت عملکرد بهینه حسگر انتخاب شده است. با بهبود ساختار، حساسیت برای حسگری با انحنای ۱۸۰ درجه به ۵۰ nm/RIU و ۵۲ nm/RIU و برای حسگری با انحنای ۹۰ درجه به ۴۷ nm/RIU و ۴۸ nm/RIU، به ترتیب برای مد‌های اول و دوم هر ساختار، افزایش یافته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد انحنای بیشتر باعث افزایش و حفظ طول مسیر نور با تشدید کننده شده و در نتیجه عملکرد حسگر بهبود می‌یابد. این حسگر را در حوزه پزشکی، محیط زیست جهت شناسایی ذرات ریزمولکولی می‌توان به کار برد.
بازنگری مقاله:	
پذیرش مقاله:	
واژگان کلیدی:	
موج‌های نجوایی، تشدید کننده، موجبر خمیده، میکرو دیسک.	

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه

دیگر منجر به اختراع حسگرهای زیستی بسیار کوچک گردیده است [۱-۳]. در میان این حسگرها، بیوحسگرهای نوری به دلیل کارایی بالا و سازگاری زیستی خوب در جهت حفظ سلامتی افراد نقش مهمی ایفا می‌کنند [۴-۷]. در سه دهه اخیر، حسگرهایی که بر اساس حالت نجوایی^۵، تشدید

افزایش تقاضای روز افزون برای شناسایی سلول‌های سرطانی، DNA، گلوکز و عوامل بیماری‌زا نظیر آنفولانزا از یک سو و چالش‌های شناسایی سریع و با دقت بالا از سوی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fatemeh.aghaei@tabrizu.ac.ir

^۱ دانشجوی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

^۲ استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

دهنده غلظت آنالیت هدف است [۱۷، ۱۸]. حسگرهای زیستی برچسب دار به دلیل افزودن یک گام بیشتر به مراحل عملکرد ساختار عموماً مورد استفاده قرار نمی گیرند. حسگرهای زیستی WGM بدون برچسب، حساسیت، انتخاب پذیری بالا، ضریب کیفیت مناسب و ابعاد کوچکتری دارند، از این رو برای کاربردهای مختلف بیولوژیکی و شیمیایی مفید می باشند [۱۹].

همانطور که ذکر شد، ساختارهای مبتنی بر WGM باید به صورت دایره ای باشند تا امواج نجوایی در سطح ساختار ایجاد گردند. از جمله این ساختارها می توان به میکرو دیسک، میکرو کره، میکرو رینگ و میکرو گبلت اشاره نمود. در این بین میکرو دیسک ها به دلیل فرآیند ساخت ساده و نیز خواص نوری فوق العاده به سبب ایجاد مدهای مختلف در زمینه حسگری کاربرد به سزایی دارند. اصولاً برای ایجاد تزویج در تشدیدکننده میکرو دیسکی، موجرها کاربردهای بیشتری نسبت به منشور و فیبر دارند. در این مقاله، ساختار بیوحسگر میکرو دیسکی مبتنی بر موجهای نجوایی مطالعه شده است و اثرات اشکال مختلف موجبر بر روی عواملی نظیر حساسیت، ضریب کیفیت و نیز شدت میدان الکتریکی بررسی شده اند. در این تحقیق نشان می دهیم که هر چه طول تزویج موجبر با تشدیدگر بیشتر باشد، خواص عملکردی حسگر بهبود می یابد. نتایج و داده ها از طریق روش تفاضل محدود حوزه ی زمان^۲ بدست آمده است. ساختار ارائه شده می تواند در زمینه های پزشکی جهت شناسایی غلظت قند خون و انواع پروتئین ها مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش مدل سازی

در مقاله حاضر، ساختار یک حسگر زیستی مبتنی بر WGM شامل یک میکرو دیسک و موجبری به ارتفاع ۲۳۰ نانومتر، مطالعه شده است. در ابتدا، مطابق شکل ۱(الف)، موجبر با خمیدگی ۱۸۰ درجه در حول دیسک به شعاع ۲ میکرومتر بررسی شده است و در گام بعد، میزان این خمیدگی به ۹۰ درجه کاهش یافته است تا تاثیر تزویج بر روی حساسیت و ضریب کیفیت نسبت به حالت اول مقایسه گردد (شکل ۱(ب)). همچنین، عرض موجبر برابر با ۳۹۰

در آن ها رخ می دهد؛ توجه دانشمندان و پژوهشگران را به خود جلب کرده اند. تئوری این حالت بر بازتاب کلی^۱ استوار است؛ که ساده بودن تئوری از جمله مزایای حسگرهای زیستی WGM می باشد [۸].

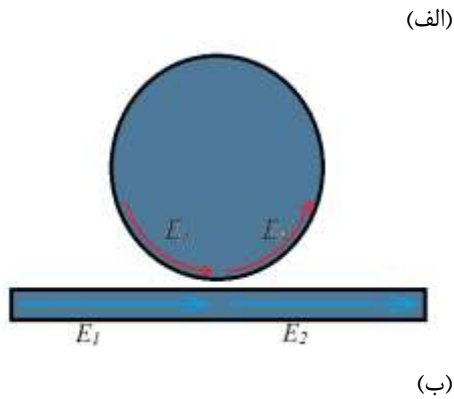
اوایل قرن نوزدهم، پدیده WGM به عنوان یک تئوری صدا مطرح گردید، که امواج فرکانس بالا و فرکانس پایین به طور مشابه در ساختارهای دایروی ایجاد می گردیدند. از این خاصیت، برای شناسایی نقص انحنای استفاده می شد [۹، ۱۰]. اما سال ها بعد، پس از انتشار نظریه ریلی و همزمان با کشف لیزر، پدیده WGM برای نور هم بسط داده شد و حسگرهای زیستی مبتنی بر موجهای نجوایی در اواخر قرن بیستم ظهور کردند [۱۱، ۱۲]. بیوحسگرهای WGM به سبب ساختار ساده و در نتیجه هزینه تولید پایین و نیز توانایی شناسایی تک مولکول ها و تک ویروس ها به دلیل دارا بودن اصول عملکردی مختلف به عنوان گزینه کارآمد پیشنهاد می شوند [۷].

از اصول عملکردی اینگونه از حسگرها، می توان به نظریه آشفته گی اشاره کرد. بر پایه نظریه ی آشفته گی پس از جذب ذره و افزایش طول مسیر نوری، به منظور حفظ تشدید، طول موج باید تغییر یابد [۱۳-۱۵]. عملکرد دیگری که بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، اثر تغییرات ضریب شکست است. با ایجاد چنین تغییراتی در محیط اطراف حسگرهای زیستی، غالباً طول موج بیشینه تشدید به سمت فرکانس های پایین تر جابجا می شود [۱۴]. اصل دیگر، قطبیت پذیری مولکولی می باشد. میدان اطراف تشدیدگر به صورت میراشونده است، در نتیجه زمانی که مولکول وارد میدان الکترومغناطیسی می شود قطبی شده و برای جبران انرژی قطبی شدگی، تغییرات در طول موج بیشینه تشدید رخ می دهد [۱۶].

حسگرهای زیستی به دو دسته کلی برچسب دار و بدون برچسب تقسیم می شوند. حسگر نوری مبتنی بر برچسب شامل استفاده از نشانگرهای فلورسنت، لومینسانس، آنزیمی یا رادیواکتیو برای تشخیص وجود مولکول های هدف است. این برچسب ها ممکن است به عنصر تشخیص زیستی یا مولکول هدف متصل شوند و شدت انتشار فلورسانس، نشان

^۱ Total Internal Reflection = TIR

^۲ Finite-Difference Time Domain



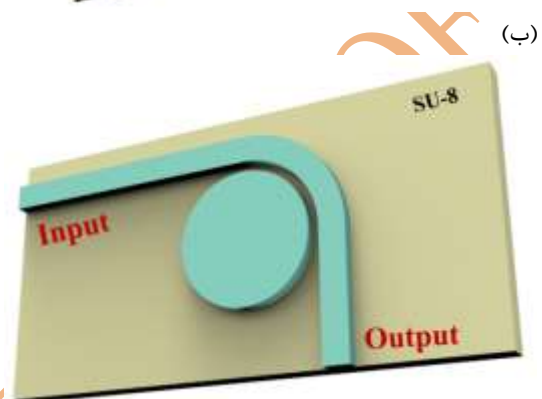
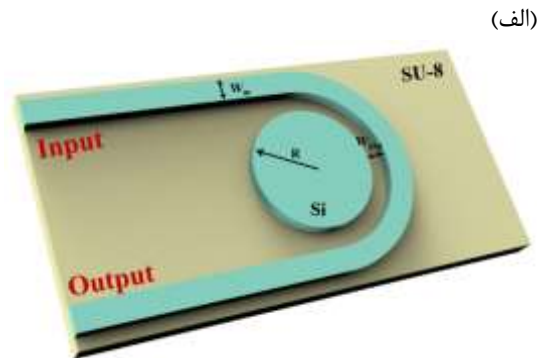
شکل ۲- (الف) نمای هندسی تشدید WGM، (ب) توزیع میدان‌های الکتریکی در دیسک و موجبر.

هم‌پوشانی این است که محیط ساختار مضرب صحیحی از طول موج تشدید باشد؛ که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۰]:

$$\lambda_{res} = \frac{n_{eff} 2\pi R}{m} \quad (1)$$

که در آن، همان طول موج تشدید، ضریب شکست موثر محیط، شعاع ساختار دایروی و بیانگر یک عدد صحیح می‌باشد. بدین ترتیب نور می‌تواند درون تشدیدکننده WGM هزاران بار دور بزند و هر بار میدان قوی‌تری را ایجاد کند. این یکی از عوامل موثر در حساسیت بالای این حسگرها می‌باشد. در یک دیسک با شعاع طبق قانون اسنل، نور داخل ساختار حبس می‌شود و می‌توان مسیر نور را به صورت شش ضلعی تخمین زد. هرچه کوچکتر باشد، مرتبه چند ضلعی افزایش می‌یابد، که برای مقادیر مسیر حرکت فوتون، دایره‌ای خواهد بود (شکل ۲(الف)).

$$\begin{cases} E_2 = \tau E_1 + ikE_3 \\ E_4 = ikE_1 + \tau E_3 \end{cases} \quad (2)$$



شکل ۱- ساختار حسگر میکرو دیسکی با موجبر خمیده (الف) ۱۸۰ درجه و (ب) ۹۰ درجه.

جدول ۱- پارامترهای هندسی و فیزیکی ساختار شکل ۱

مقدار	سمبل	پارامتر
۳۹۰ nm	W_m	عرض موجبر
۹۰ nm	W_{gap}	فاصله موجبر و میکرو دیسک
۲۳۰ nm	-	ارتفاع موجبر و میکرو دیسک
۲ μm	R	شعاع میکرو دیسک
۱.۵۵	SU-8	ضریب شکست بستر

نانومتر در نظر گرفته شده است. جنس دیسک و موجبر از سیلیکون و ماده به کار رفته برای بستر نوعی شیشه با نام SU-8 با ضریب شکست تقریبی ۱/۵۵ در طول موج کاری حسگر (۱/۵-۱/۶ میکرومتر) می‌باشد. پارامترهای هندسی و فیزیکی ساختار شکل ۱ در جدول ۱ ذکر شده‌اند. در اینگونه ساختارها، نور عموماً از منبعی با عنوان منبع مد^۱ اعمال می‌گردد؛ تا نور با بیشترین شدت در راستای موجبر نوسان کند.

هنگامی که امواج حبس شده در داخل تشدیدگر، با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند، امواج نجوایی شکل خواهند گرفت و توان میدان حبس شده در ساختار افزایش می‌یابد. شرط

(الف)

در اینجا، k ضریب تزویج متقابل موجبر و دیسک، τ ضریب خود تزویج موجبر و دیسک می‌باشد، که رابطه‌ی $\tau^2 + k^2 = 1$ برقرار است. از طرفی E_3 را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$E_3 = \alpha e^{i\varphi} E_4 \quad (۳)$$

که در آن، α و φ به ترتیب بیانگر ضریب کاهش شدت و شیف فاز ی رفت و برگشت می‌باشد. بدین ترتیب، پس از جایگذاری روابط بیان شده در رابطه‌ی (۲)، طیف انتقالی میکرو دیسک بدین ترتیب بدست می‌آید [۲۳]:

$$T = \left| \frac{E_2}{E_1} \right| = \frac{\alpha^2 + \tau^2 - 2\alpha\tau \cos \varphi}{\alpha^2 + \alpha^2 \tau^2 - 2\alpha\tau \cos \varphi} \quad (۴)$$

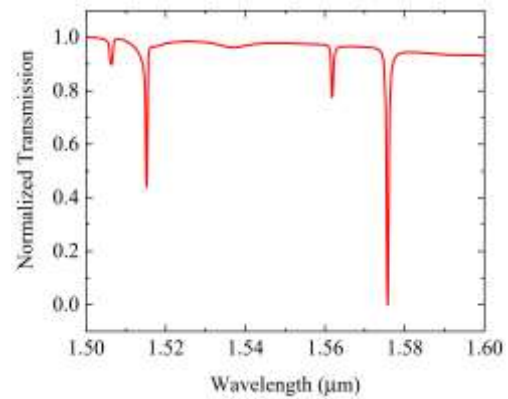
۳- نتایج و بحث

شکل ۱، به ترتیب ساختار کلی میکرو دیسک با موجبر خمیده ۱۸۰° و ۹۰° را نمایش می‌دهد. در ابتدا به بررسی خواص موجبر خمیده ۱۸۰° پرداخته می‌شود.

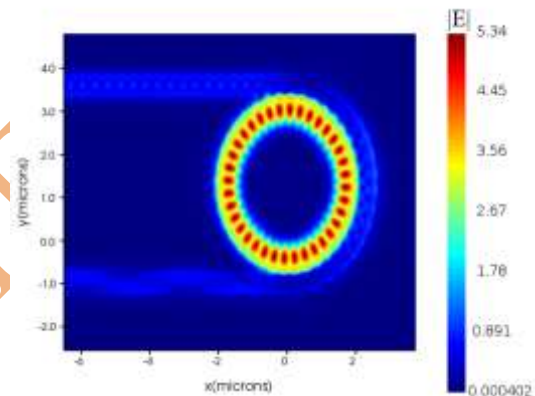
شکل ۳(الف)، نمودار انتقال این ساختار می‌باشد. در طول موج‌های $۱/۵۰۶۱۵$ و $۱/۵۶۱۸۱$ میکرومتر تشدید در مد اول رخ می‌دهد و طول موج‌های تشدید مد دوم در

$۱/۵۱۵۲۳$ و $۱/۵۲۵۷۲$ میکرومتر هستند. فاصله طول موج‌های تشدید در هر مد به ترتیب برابر با ۵۶ و ۶۱ نانومتر می‌باشد. توزیع نمایه میدان الکتریکی مدهای اول و دوم، در شکل ۳(ب-ج)، نمایش داده شده است.

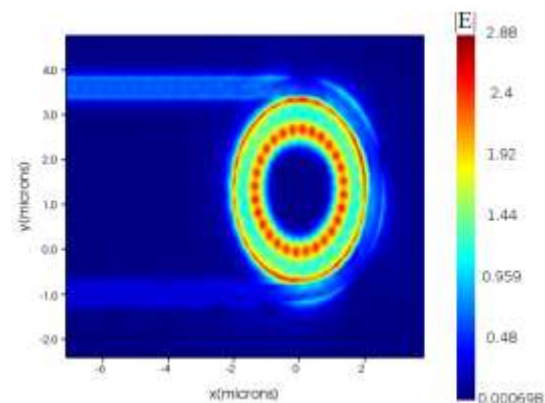
در گام بعد، به بررسی و یافتن فاصله بهینه موجبر و میکرو دیسک (W_{gap}) پرداخته می‌شود. برای این منظور طبق شکل ۴، دو عامل نرخ طیف خاموشی^۱ و پهنای کامل در نصف مقدار توان بیشینه^۲ برای فواصل ۳۰ تا ۱۲۰ نانومتر با گام‌های ۳۰ نانومتری در هر دو مد مورد بررسی قرار گرفته است. هر چه میزان FWHM کمتر باشد، مقدار انتخابگری ساختار بالا می‌رود. مقایسه این شکل‌ها نشان می‌دهد که



(ب)



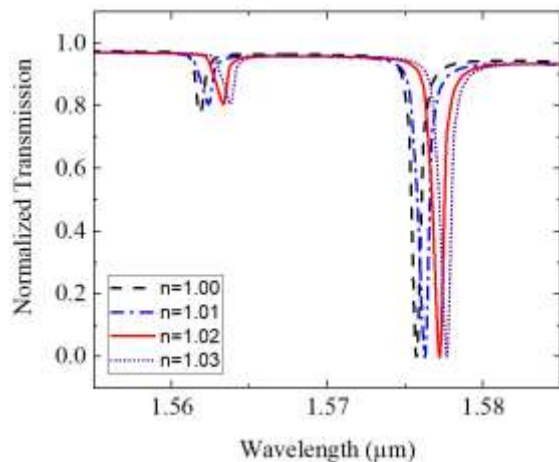
(ج)



شکل ۳- (الف) طیف انتقال نرمالیزه شده برای تشدیدگر میکرو دیسکی با موجبر خمیده ۱۸۰° درجه بر حسب طول موج. نمایه میدان الکتریکی (ب) مد اول و (ج) مد دوم.

^۱ Extinction Rate = ER

^۲ Full Width at Half Maximum = FWHM



شکل ۵- نمودار تغییرات طیف انتقال به هنگام تغییر ضریب شکست محیط اطراف حسگر با موجبری با انحنای ۱۸۰ درجه.

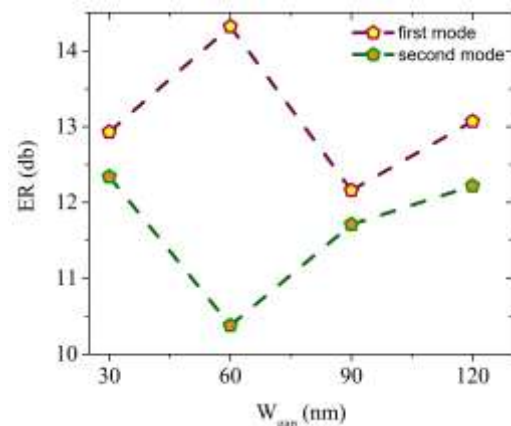
محیط اطراف تشدیدگر $(S = \Delta\lambda_r / \Delta n)$ بررسی می‌شود [۲۳]. ضریب شکست (n) در بازه‌ی ۱ تا ۱.۰۳ با گام‌های ۰.۰۱ تغییر می‌یابد. نمودار مربوط به تغییر طول موج تشدید در شکل ۵، جهت محاسبه حساسیت ارائه شده است.

بر اساس مقادیر به دست آمده حساسیت برای این ساختار در مد اول و دوم به ترتیب برابر با ۵۰ RIU/nm و ۵۲ RIU/nm و ضریب کیفیت به ترتیب برابر ۲۰۱۵ و ۲۲۵۱ می‌باشد.

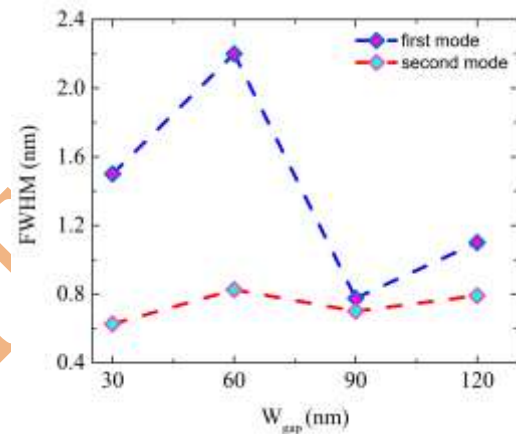
در ادامه، به بررسی خواص حسگر میکرو دیسکی با موجبری به انحنای ۹۰° که در شکل ۱(ب) ارائه شد، پرداخته می‌شود. شکل ۶، نمودار انتقال نرمالیزه شده بر حسب طول موج در بازه‌ی ۱/۵ میکرومتر تا ۱/۶ میکرومتر با W_{gap} برابر ۹۰ نانومتر را نمایش می‌دهد. در این حالت طول موج تشدید برای مد اول ۱/۵۰۶۱۵ و ۱/۵۶۱۲۹ میکرومتر می‌باشد که بیانگر فاصله بین مدی ۵۵ نانومتری است. همچنین برای مد دوم طول موج‌های تشدید در ۱/۵۱۴۲۷ و ۱/۵۷۴۶۸ میکرومتر با فاصله بین مدی ۶۰ نانومتری رخ می‌دهند.

طیف انتقالی موجبر با انحنای ۹۰ درجه دارای افت و اعوجاج بیشتری نسبت به ساختار اول می‌باشد، که این امر از تزویج بهتر در ساختار موجبر خمیده ۱۸۰ درجه‌ای ناشی می‌شود. از طرفی به همین سبب، شدت نمایه میدان الکتریکی در هر دو مد برای ساختار اول مقادیر بالاتری دارد.

(الف)



(ب)

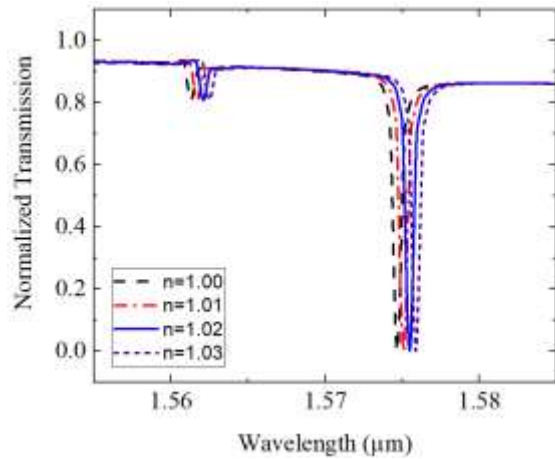


شکل ۴- (الف) رابطه طیف خاموشی و (ب) پهنای کامل در نصف مقدار توان بیشینه برای فاصله گپ‌های مختلف.

در W_{gap} برابر با ۹۰ نانومتر بهترین انتخابگری رخ می‌دهد. طیف نرخ خاموشی برابر با می‌باشد، که به ترتیب

بیانگر مقدار توان بیشینه و کمینه طول موج خروجی می‌باشند [۲۲]. مقدار بیشینه ER برای تشخیص پیک‌های تشدید مناسب‌تر می‌باشد. بیشترین مقدار ER در مد اول در فاصله‌ی گپ ۶۰ نانومتر و برای مد دوم در فاصله‌ی گپ ۳۰ نانومتر رخ می‌دهد. از طرفی چون انتخابگری و در نتیجه ضریب کیفیت $(Q = \lambda_r / FWHM)$ ، نسبت به طیف خاموشی اهمیت بیشتری دارد، بنابراین W_{gap} بهینه ۹۰ نانومتر انتخاب می‌شود.

در مرحله‌ی بعد، مهمترین عامل برای حسگرها و تشدیدکننده‌ها که همان حساسیت می‌باشد، بر اساس نسبت تغییرات طول موج تشدید به تغییرات ضریب شکست

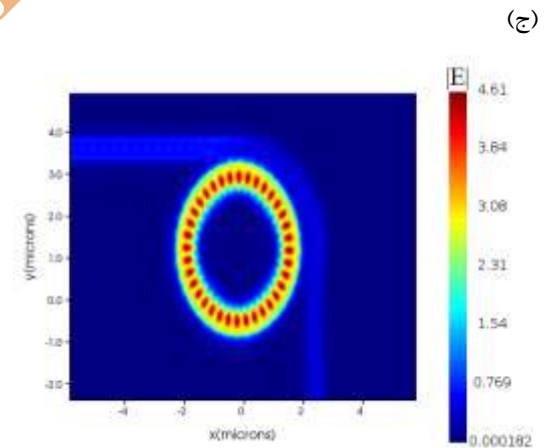
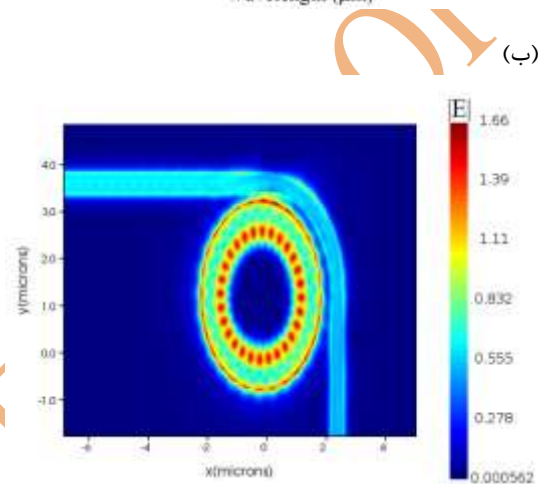
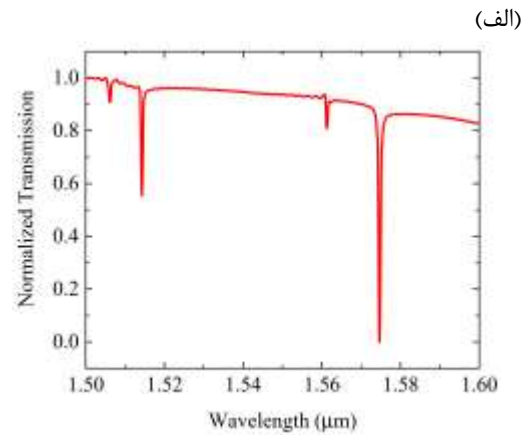


شکل ۷- نمودار تغییرات طیف انتقال به هنگام تغییر ضریب شکست محیط اطراف حسگر با موجبری با انحنای ۹۰ درجه.

جدول ۲- مقایسه مطالعه اخیر ما با سایر کارهای مشابه

مرجع	S (nm/RIU)	Q	FOM=S/FWHM (RIU ⁻¹)[1]	فاصله بین دو مد
[23]	۲۹	۵۹۹۰	-	۵۵
	۳۸/۸۸	۱۲۰۰	-	۶۰
[25]	۵۵/۲	۲۰۰	-	-
	۵۵/۸	۱۵۰	-	-
[26]	۴۵/۸۸	۱۵۰۰	-	۱۸
	۷۲/۹۴	۲۰۰	-	۱۸
کار ما	۵۰	۲۰۱۵	۶۴/۵	۵۵
	۵۲	۲۲۵۱	۷۵/۰۳	۶۰

ضریب کیفیت بدست آمده برای مد اول ۲۵۱۸ و مد دوم ۲۵۰۷ می باشد. لازم به ذکر است سایر خواص نوری در جدول ۲- آورده شده است. در این جدول به مقایسه ساختار مورد مطالعه در این مقاله با سایر کارهای پیشین پرداخته شده است. مشاهده می شود ساختار ارائه شده به دلیل پهنای عرضی بسیار پایین دارای ضریب کیفیت و معیار شایستگی بالایی می باشد. این پدیده در نتیجه تزویج قوی بین موجبر و تشدیدگر رخ می دهد.



شکل ۶- (الف) طیف انتقال نرمالیزه شده برای تشدیدگر میکرو دیسکی با موجبر خمیده ۹۰ درجه بر حسب طول موج. نمایه میدان الکتریکی (ب) مد اول و (ج) مد دوم.

در گام بعد به بررسی حساسیت ساختار ارائه شده در شکل ۱(ب) پرداخته می شود. بازه ی تغییرات ضریب شکست محیط اطراف حسگر از ۱ تا ۱/۰۳ با فواصل ۰/۰۱ می باشد، که نتایج به دست آمده در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج نشان می دهند که حساسیت برای مد اول و دوم به ترتیب برابر با ۴۷ nm/RIU و ۴۸ nm/RIU می باشد.

طبق نتایج بدست آمده، حساسیت و شدت میدان الکتریکی برای حسگر با موجبر خمیده ۱۸۰ درجه، مقادیر بالاتری را نسبت به ساختار دیگر دارد؛ اما برای ضریب کیفیت این امر صادق نیست. ضریب کیفیت برای حسگر با موجبر خمیده ۹۰ درجه مقدار عددی بهتری را دارا می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

ایجاد تغییر در ابعاد و اندازه ساختار هندسی بر روی خواص نوری و طول موج تشدید آن تاثیر می‌گذارد. بنابراین با تغییر فاصله بین موجبر و میکرو دیسک، مقدار بهینه آن که بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد، بدست آمد. در این مقاله، اثرات شکل موجبر بر روی مهمترین معیارهای یک حسگر نظیر حساسیت، انتخابگری و ضریب کیفیت در دو حالت انحنای ۱۸۰° و ۹۰° بررسی شد. بر اساس داده‌ها و نتایج

بدست آمده، حالتی که موجبر در آن انحنای ۱۸۰ درجه‌ای دارد، به دلیل داشتن بیشترین مسیر نوری با تشدیدکننده و در نتیجه افزایش اثر تزویج پاسخ نوری مناسب‌تری را ارائه می‌دهد. با تغییر ضریب شکست محیط، شیفت قرمز در طول موج‌های تشدید رخ می‌دهد و عمل شناسایی صورت می‌گیرد. حساسیت مدهای اول و دوم در حالتی که موجبر خمیدگی ۱۸۰ درجه دارد به ترتیب برابر با ۵۰ nm/RIU و ۵۲ nm/RIU می‌باشد. نسبت به این ساختار، حسگر دارای موجبر با ۹۰ درجه انحنای حساسیت ۴۷ nm/RIU و ۴۸ nm/RIU را برای مدهای اول و دوم ارائه می‌دهد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد

مراجع

- [1] Keshizadeh, Hadi, Fatemeh Aghaei, Hamid Bahador, and Hamid Heidarzadeh. "Improvement of cavity plasmon resonance in high-sensitivity MIM nanostructure with rectangular air stubs inside the hexagonal-ring resonator." *Physica Scripta* 98, no. 2 (2023): 025014.
- [2] Nakhjavani, Sattar Akbari, Hadi Mirzajani, Sandro Cararra, and Mehmet C. Onbaşlı. "Advances in biosensor technologies for infectious diseases detection." *TrAC Trends in Analytical Chemistry* (2024): 117979.
- [3] Aghaei, Fatemeh, Saeed Golmohammadi, Hadi Soofi, Hamid Bahador, and Iraj Ahadzadeh. "The Multilayer Cluster Micro-Sphere Biosensor for Single Nanoparticle Detection by Using WGM Excitation." *Optik* (2024): 172194.
- [4] Chen, Huawei, Xinye Fan, Wenjing Fang, Bingyuan Zhang, Shuangshuang Cao, Qinghe Sun, Dandan Wang et al. "High-Q Fano resonances in all-dielectric metastructures for enhanced optical biosensing applications." *Biomedical Optics Express* 15, no. 1 (2023): 294-305.
- [5] Zhang, Ya-nan, Yong Zhao, Tianmin Zhou, and Qilu Wu. "Applications and developments of on-chip biochemical sensors based on optofluidic photonic crystal cavities." *Lab on a Chip* 18, no. 1 (2018): 57-74.
- [6] Shao, Baoyi, and Zhongdang Xiao. "Recent achievements in exosomal biomarkers detection by nanomaterials-based optical biosensors-a review." *Analytica chimica acta* 1114 (2020): 74-84.
- [7] Shopova, S. I., R. Rajmangal, S. Holler, and S. Arnold. "Plasmonic enhancement of a whispering-gallery-mode biosensor for single nanoparticle detection." *Applied Physics Letters* 98, no. 24 (2011).
- [8] Righini, Giancarlo C., and Silvia Soria. "Biosensing by WGM microspherical resonators." *Sensors* 16, no. 6 (2016): 905.
- [9] Bate, A. E. "Note on the whispering gallery of St Paul's Cathedral, London." *Proceedings of the Physical Society* 50, no. 2 (1938): 293.
- [10] Matsko, A. B., A. A. Savchenkov, D. Strekalov, V. S. Ilchenko, and L. Maleki. "Review of applications of whispering-gallery mode resonators in photonics and nonlinear optics." *IPN Progress Report* 42, no. 162 (2005): 1-51.
- [11] Baaske, Martin D., Matthew R. Foreman, and Frank Vollmer. "Single-molecule nucleic acid interactions monitored on a label-free microcavity biosensor platform." *Nature nanotechnology* 9, no. 11 (2014): 933-939.
- [12] Chakrabarti, Kishalay, Mohammad S. Obaidat, Shahriar Mostufa, and Alok Kumar Paul. "Design and analysis of a multi-core whispering gallery mode bio-sensor for detecting cancer cells and diabetes tear cells." *OSA Continuum* 4, no. 8 (2021): 2294-2307.
- [13] Arnold, S., M. Khoshshima, Iwao Teraoka, S. Holler, and F. Vollmer. "Shift of whispering-gallery modes in microspheres by protein adsorption." *Optics letters* 28, no. 4 (2003): 272-274.
- [14] Vollmer, F. and S. Arnold, Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules. *Nature methods*, 2008. 5(7): p. 591-596.
- [15] Teraoka, Iwao, Stephen Arnold, and Frank Vollmer. "Perturbation approach to resonance shifts of whispering-gallery modes in a dielectric microsphere as a probe of a surrounding medium." *JOSA B* 20, no. 9 (2003): 1937-1946.
- [16] Vollmer, Frank. "Taking detection to the limit." *BIF Futura* 20, no. 6 (2005).
- [17] Borisov, Sergey M., and Otto S. Wolfbeis. "Optical biosensors." *Chemical reviews* 108, no. 2 (2008): 423-461.
- [18] Lequin, Rudolf M. "Enzyme immunoassay (EIA)/enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA)." *Clinical chemistry* 51, no. 12 (2005): 2415-2418.
- [19] Ghali, Hala, Hicham Chibli, Jay L. Nadeau, Pablo Bianucci, and Yves-Alain Peter. "Real-time detection of *Staphylococcus aureus* using Whispering Gallery Mode optical microdisks." *Biosensors* 6, no. 2 (2016): 20.

- [20] Le, Thanh M. "Integration of practical high sensitivity whispering gallery mode resonator sensors." PhD diss., University of Southern California, 2012.
- [21] Xia, Dunzhu, Lingchao Huang, and Liye Zhao. "A new design of an MOEMS gyroscope based on a WGM microdisk resonator." *Sensors* 19, no. 12 (2019): 2798..
- [22] Aghaei, Fatemeh, and Hamid Bahador. "High sensitivity metal-insulator-metal sensor based on ring-hexagonal resonator with a couple of square cavities connected." *Physica Scripta* 97, no. 6 (2022): 065508.
- [23] Zhang, Ping, Dongyue He, Chen Zhang, and Zhiruo Yan. "FDTD simulation: simultaneous measurement of the refractive index and the pressure using microdisk resonator with two whispering-gallery modes." *Sensors* 20, no. 14 (2020): 3955.
- [24] Aghaei, Fatemeh, Hamid Bahador, and Saeed Golmohammadi. "Design of a novel THz metamaterial based on combination of different split-ring resonators." In *2022 4th West Asian Symposium on Optical and Millimeter-wave Wireless Communications (WASOWC)*, pp. 1-4. IEEE, 2022.
- [25] Ni, Xiaoqi, Ming Wang, Dongmei Guo, Hui Hao, and Jiali Zhu. "A hybrid Mach–Zehnder interferometer for refractive index and temperature measurement." *IEEE Photonics Technology Letters* 28, no. 17 (2016): 1850-1853.
- [26] Ma, Tao, Jinhui Yuan, Lei Sun, Zhe Kang, Binbin Yan, Xinzhu Sang, Kuiru Wang et al. "Simultaneous measurement of the refractive index and temperature based on microdisk resonator with two whispering-gallery modes." *IEEE Photonics Journal* 9, no. 1 (2017): 1-13.

[۶] بنی اسدی، نازنین. "مدیریت مشارکتی معلمان و ارتباط آن با رفتار جامعه مدنی دانش آموزان". روان‌شناسی علوم تربیتی ۲۳، ۲ (۱۳۸۳): ۱۷۵-۱۹۸.

[۷] زارع، اصغر، و علی محمدزاده. "حذف نویز ضربه‌ای از تصاویر دیجیتال مبتنی بر تخمین توزیع مکانی نویزها". نشریه مدل‌سازی در مهندسی ۱۲، ۳۹ (۱۳۹۳): ۱۳-۲۹.

[۸] وزیری، اسماعیل، نادر نقشینه، و عبدالرضا نوروزی چاکلی. "موانع و چالش‌های اشتراک‌گذاری داده‌های پژوهشی". پژوهشنامه کتابداری و اطلاع‌رسانی ۹، ۲ (۱۳۹۸): ۵-۲۳.

[۹] بلوری بزاز، جعفر، ایرج رحمانی، و جعفر نجفی زاده. "بهینه‌سازی آرایش نامنظم گروه شمع‌ها با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک تحت بارگذاری نامتقارن". ششمین کنگره ملی عمران. ۲۰۱۱.

[۱۰] حیدری، قدرت‌الله. طراحی الکتریکی خطوط انتقال نیرو. چاپ اول، انتشارات تابش برق، ایران، ۱۳۷۹.