

طراحی نانو حس گر زیستی پلاسمونیک مبتنی بر تشدیدگر حلقوی بلوره فوتونی جهت تشخیص غلظت گلوکز با حساسیت و فاکتور کیفیت بالا

پریسا محمدی صادق آبادی^{*}، زهرا اعلایی

دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

چکیده

در این مقاله به طراحی و شبیه سازی یک نانوحس گر زیستی بر پایه بلوره فوتونی دوبعدی با استفاده از رزوناتور حلقوی مربعی برای کنترل غلظت گلوکز پرداخته شده است. ویژگی های نوری رزونانس حلقوی مربعی با استفاده از روش FDTD تحلیل و پیش بینی شده است. این حس گر شامل یک موج بر افقی و یک موج بر خروجی عمودی و یک نانو تشدیدگر است. پارامترهای حساس در رزوناتور حلقوی بستگی به ضریب شکست های مواد مورد استفاده دارد. به همین ترتیب غلظت گلوکز را می توان در نظارت قرار داد. در حس گر زیستی با تغییر ماده مور اندازه گیری، ضریب شکست آن تغییر می کند که باعث تغییر در نحوه انتشار پالس می شود و با اندازه گیری طول موج تشدید در ساختار موج بر، می توان عملیات اندازه گیری را انجام داد. به منظور انعطاف پذیری ساختار طراحی شده و همچنین، کاربردی بودن آن به ایجاد تغییراتی در موج برهای خروجی ساختار پرداخته شده است. با انتخاب میله های پراکندگی از جنس نانوذرات طلا به دلیل اثرهای پلاسمونیک بر ساختار، پارامترهای طول موج رزونانس، ضریب کیفیت و حساسیت به ترتیب حدود ۱۵۵۴ نانومتر، ۸۵۰ و ۶۶۰ nm/RIU به دست آمده است. همچنین، به دلیل عملکرد نانوحس گر در گستره سوم طول موج مخابراتی، پراکندگی نیز در حداقل مقدار خود قرار دارد.

واژه های کلیدی: نانوحس گر زیستی، بلوره فوتونی، حساسیت، فاکتور کیفیت، پلاسمونیک، گلوکز.

ایمیل نویسنده مسئول: alaie.zahra@yahoo.com

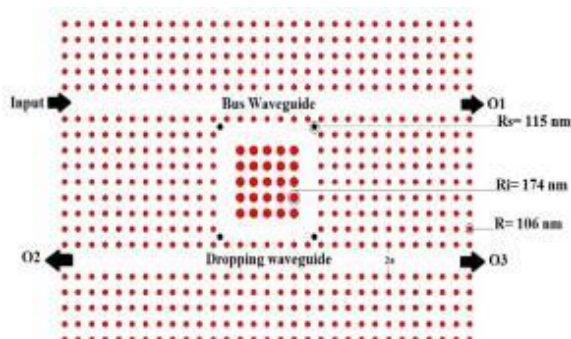
۱- مقدمه

با اندازه گیری طول موج تشدید در ساختار موج بر، که با تغییر ماده مورد اندازه گیری و مشخصات موج بر بلور نوری تغییر می کند، می توان عملیات اندازه گیری را انجام داد. حس گر زیستی وسیله ای است که از دو جزء اساسی: ۱- گیرنده زیستی، ۲- مبدل، تشکیل شده است [۱].
تابه حال حس گرهای زیستی متنوعی ارایه شده اند، که عبارت اند از حس گرهای زیستی مبتنی بر تداخل، حس گرهای زیستی مبتنی بر موج بر نوری، حس گرهای زیستی مبتنی بر فیبرهای نوری، حس گرهای زیستی مبتنی بر حلقه های تشدیدگر و حس گرهای زیستی مبتنی بر بلورهای فوتونی.
بلورهای فوتونی ساختارهای متناوبی هستند که در گستره فرکانسی مشخصی، اجازه عبور موج های الکترومغناطیس را از میان خود نمی دهد. از این رو، می توان با ایجاد نقص در آن ها، نور را در این گستره فرکانسی (شکاف باند فوتونی) به شدت محبوس کرد [۲ و ۳].
نخستین حس گر زیستی، یک حس گر بر پایه آنزیم گلوکز اکسیداز، برای بیماران دیابتی در اوایل سال ۱۹۶۰ ساخته شد.

دیابت یک اختلال متابولیک در بدن است. در این بیماری بدن در برابر انسولین مقاوم شده و ازدیاد قند خون منجر به بیشتر شدن غلظت گلوکز از گستره نرمال ۲٫۶ تا ۳٫۹ میلی مولار می شود. از این رو، بررسی کمی غلظت گلوکز خون بسیار اهمیت دارد. روش های اندازه گیری گلوکز به دو روش کلی تهاجمی و غیرتهاجمی تقسیم بندی می شود. در روش های تهاجمی می توان به دستگاه گلوکومتر و آزمایش های متنوع اشاره کرد. در روش غیرتهاجمی به طیف سنجی رامان، طیف سنجش امپدانس و غیره می توان اشاره کرد. اما به دلیل نیاز به نمونه خون بیشتر، اثر تدافعی سایر مولکول ها، آلودگی هوا برد و یا انگشت و غیره نتیجه ها نادرست است. استفاده از حس گر زیستی بر پایه بلوره فوتونی بسیار مناسب است، زیرا توانایی فوق العاده در تشخیص زودهنگام دارد.

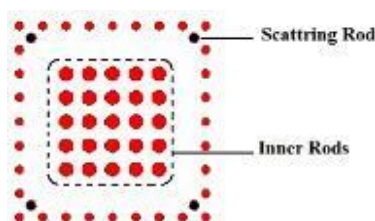
در استفاده از ساختار بلوره فوتونی به عنوان حس گر، در عمل با تغییر ماده مورد اندازه گیری، ضریب شکست آن تغییر می کند. تغییر ضریب شکست ماده در نحوه انتشار پالس اثر گذاشته و

است. این ساختار یک پورت ورودی به همراه سه پورت خروجی (O1, O2, O3) دارد (شکل ۱).



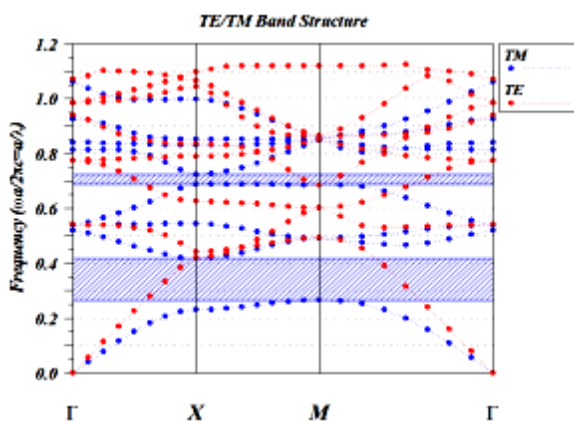
شکل ۱: ساختار حسگر نوری مبتنی بر تشدیدگر حلقوی مربعی بلور فوتونی.

برای جلوگیری از پراکندگی نور و بازتاب نور به درون موج بر از میله‌های پراکندگی در گوشه‌های تشدیدگر استفاده شده است (شکل ۲). این میله‌ها با تبدیل هر گوشه تشدیدگر به یک مثلث قائم‌الزاویه از اثر پس تابش نور می‌کاهند. برای کنترل طول موج موردنظر درون ساختار تشدیدگر حلقوی از میله‌های درون تشدیدگر با شعاعی بزرگتر از شعاع دیگر میله‌های ساختار استفاده شده است که برابر با $R_i = 174 \text{ nm}$ است.



شکل ۲: تشدیدگر حلقوی مربعی بلور فوتونی موردنظر.

ساختار دارای ۲ شکاف باند فوتونی در مدهای TM است. محور افقی و عمودی در نمودار باند به ترتیب بردار موج و فرکانس نرمال را نشان می‌دهد. بردار موج در منطقه برلیون محاسبه شده است که برابر با تمام ساختار دوره‌ای است (شکل ۳).



شکل ۳: نمودار شکاف باند فوتونی ساختار حسگر نوری موردنظر با ثابت شبکه مربعی.

در سال ۲۰۱۶ نیهای و همکارانش یک حسگر زیستی بسیار حساس مبتنی بر بلور فوتونی با نقص چهره طراحی ارایه دادند. این حسگر دارای حساسیت 359 nm/RIU و ضریب کیفیت ۴۷۷ است [۴].

یک سال بعد سوگانیا و همکارانش یک حسگر بر پایه بلور فوتونی دوبعدی با استفاده از رزوناتور حلقه لوزی برای کنترل غلظت گلوکز طراحی کردند. طول موج رزونانس، فاکتور کیفیت و قدرت خروجی حسگر به ترتیب برابر با ۱۵۴۶ نانومتر، ۱۷۸٫۵ و ۱۰۰٪ است [۵].

در سال ۲۰۱۹ مونیر و همکارانش، یک حسگر زیستی که از یک رزونانس نوری در بلور فوتونی سیلیکون یک‌بعدی با نقص هوا استفاده می‌کند، طراحی کردند، که حساسیت ۱۱۸ نانومتری واحد ضریب شکست را نشان می‌دهد [۶].

در این مقاله به طراحی نانوحسگر زیستی بلور فوتونی با موج‌بر عمودی تک خروجی، به علت ویژگی‌های خاص تشدیدگرهای حلقوی، انعطاف‌پذیری بالا و ساختارهای متنوعی که دارند و همچنین راحتی طراحی در آن‌ها، پرداخته می‌شود. در بخش دوم، مکانیسم سنجش در حسگرهای زیستی موردبررسی قرار می‌گیرد، و در ادامه طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی نانوحسگر بررسی می‌شود.

۲- مکانیسم سنجش در حسگرهای زیستی

شناسایی در حسگرهای زیستی بلور فوتونی در دو دسته شناسایی مبتنی بر فلورسانس و شناسایی بدون برچسب قرار می‌گیرند [۷]. در شناسایی مبتنی بر فلورسانس، هر دو مولکول زیستی هدف و مولکول شناسایی زیستی با علامت فلورسنت مانند رنگ، برچسب‌دار می‌شوند. شدت فلورسانس نشان‌دهنده حضور مولکول هدف و قدرت تعامل بین مولکول هدف و مولکول شناسایی زیستی است. این تشخیص بسیار حساس است و تشخیص را به یک تک مولکول محدود می‌کند. اما این روش دارای محدودیت فرایندهای دشوار برچسب‌گذاری است.

در تشخیص بدون برچسب مولکول‌های هدف، برچسب‌دار نیست و در شکل‌های طبیعی خود شناسایی می‌شوند. این روش به نسبت آسان و ارزان انجام می‌شود. برخی از سازوکارهای تشخیص بدون برچسب، تغییرات ضریب شکست بر اثر فعل و انفعالات مولکولی را اندازه‌گیری می‌کند. تغییرات ضریب شکست به جای آن‌که به کل جرم نمونه وابسته باشد، به غلظت نمونه و یا تراکم سطح مربوط است. این ویژگی برای تشخیص‌های خیلی کوچک هدف مناسب است.

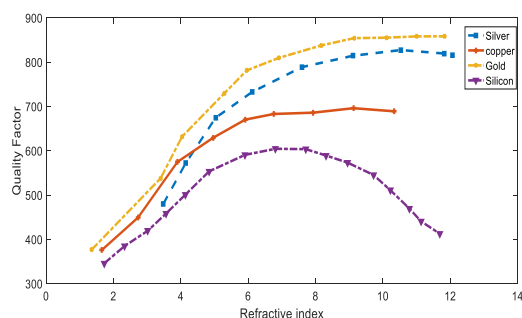
۳- طراحی نانو حسگر زیستی

برای طراحی و شبیه‌سازی حسگر زیستی پیشنهادی از Rsoft، که یک نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی مبتنی بر الگوریتم FDTD است، استفاده شده است. ساختار طراحی شده شامل میله‌های هوا در بستر سیلیکون است. تعداد کل میله‌های ساختار را برابر با ۲۱۳۱ و ثابت شبکه را $0.5 \mu\text{m}$ در نظر می‌گیریم ساختار شامل دو موج‌بر و یک تشدیدگر حلقوی مربعی در بین دو موج‌بر

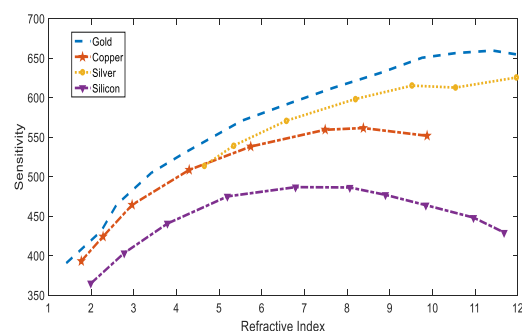
با توجه به مشخصات موجبر، شدت توان در خروجی موجبر متفاوت می‌شود که با تغییر مشخصات ساختاری می‌توان حساسیت و شدت خروجی در ساختار را افزایش داد. در استفاده از ساختار موجبری بلور فوتونی به‌عنوان حسگر، در عمل با تغییر ماده مورد اندازه‌گیری، ضریب شکست آن تغییر می‌کند. تغییر ضریب شکست ماده در نحوه انتشار پالس اثر گذاشته و با اندازه‌گیری طول موج تشدید در ساختار موجبر، که با تغییر ماده مورد اندازه‌گیری و مشخصات موجبر بلور نوری تغییر می‌کند، می‌توان عملیات اندازه‌گیری را انجام داد.

۴- بررسی اثرات پلاسمونیک بر ساختار

به‌منظور بررسی اثر پلاسمونیک، با انتخاب مواد با ضریب‌های شکست متفاوت عملکرد ساختار بررسی می‌شود. از نانوذرات طلا، نقره و مس در میله‌های پراکندگی استفاده شده است، و حساسیت و فاکتور کیفیت بررسی می‌شود. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات طلا نسبت به نانوذرات مس و نقره باعث می‌شود پارامترهای حساسیت و فاکتور کیفیت ارتقا پیدا کند (شکل ۵ و ۶).



شکل ۵: نمودار فاکتور کیفیت برحسب ضریب شکست.



شکل ۶: نمودار حساسیت برحسب ضریب شکست.

۵- نتیجه‌ها و بحث

ساختار شکل ۴، قادر به تفکیک طول موج ۱۵۵۴ nm با میزان ضریب انتقال ۱۰۰٪، پهنای باند ۳/۲ nm و ضریب کیفیت ۴۸۵ است (شکل ۷).

نحوه تفکیک رفتار نور طول موج ۱۵۵۴ nm در شکل ۸ - الف در ساختار حسگر نوری موردنظر نمایش داده شده است و همچنین در شکل ۸ - ب، مقدار توان نرمالیزه شده ساختار در

فرکانس نرمال ساختار بلور فوتونی $\omega a/2\pi c = a/\lambda$ است که فرکانس زاویه‌ای است، a ثابت شبکه است، c سرعت نور در فضای آزاد است و λ طول موج فضای آزاد است (جدول ۱). از بین دو شکاف باند فوتونی ارایه شده، محدوده شکاف باند فوتونی در مد TM که در پایین است مناسب تشخیص داده شده است. زیرا دربرگیرنده کانال طول موجی مناسبی است که حسگرها و دیگر ادوات نوری متفاوت در شبکه‌های مخابراتی در آن گستره کار می‌کنند؛ بنابراین تمامی شبیه‌سازی‌های این طراحی در مد TM انجام می‌شود.

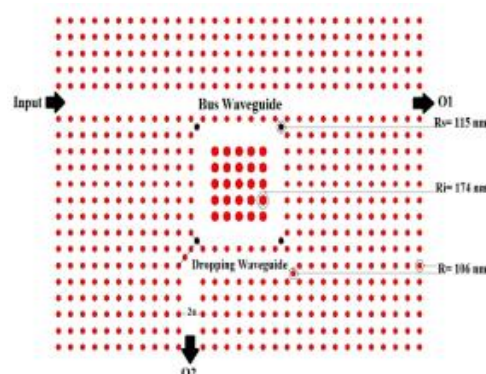
جدول ۱: فرکانس و طول موج ساختار باند.

طول موج (nm)	فرکانس (a/λ)	انواع شکاف باند
1.88-1.19 μm	0.265-0.418	TM
0.726-0.69 μm	0.688-0.724	TM

حسگرهای نوری همواره دارای انعطاف‌پذیری بالا به‌منظور کاربردی بودن و استفاده از آن‌ها در دیگر ادوات نوری که در زمینه‌های WDM مورد استفاده هستند. یکی از این انعطاف‌پذیری‌ها در این مورد را می‌توان در موجبرهای آن‌ها اشاره کرد که باید این موجبرها از انعطاف‌پذیری کافی برخوردار باشند تا قادر به کوچک شدن ساختار و تشکیل ساختارهای کاربردی دیگر از جمله دی‌مالتی‌پلکسرهای نوری و... را داشته باشند. به همین منظور در ادامه به بررسی انعطاف‌پذیری موجبرهای خروجی این ساختار به‌منظور طراحی دیگر ادوات نوری مبتنی بر این طراحی پرداخته شده است.

۳-۱- حسگر نوری مبتنی بر تشدیدگر حلقوی بلور فوتونی با استفاده از موجبرهای عمودی با یک خروجی

طراحی حسگر نوری با استفاده از ساختار موجبرهای عمودی با یک خروجی در شکل ۴ قابل مشاهده است. مطابق شکل ساختار ارایه شده دارای یک پورت ورودی به همراه دو پورت خروجی ($O1$) است که یک پورت خروجی در موجبر مستقیم بالا و دیگری در حالت عمودی و در پایین تشدیدگر حلقوی قرار دارد که این موجبر با ایجاد یک نقص خطی و تقاطع آن با یک نقص عمودی ایجاد شده است. در این موجبر نیز مانند ساختار قبل برای کاهش اثر پس‌تابش و همچنین، هدایت بهتر نور درون موجبر از میله پراکندگی استفاده شده است.



شکل ۴: ساختار حسگر نوری مبتنی بر تشدیدگر حلقوی مربعی بلور فوتونی با موجبر خروجی عمودی با یک پورت خروجی.

جدول ۲: ضریب شکست، طول موج، حساسیت، ضریب کیفیت و ضریب انتقال حسگر در غلظت‌های متفاوت گلوکز.

غلظت گلوکز	ضریب شکست	طول موج تشدید (nm)	حساسیت	ضریب کیفیت	بازده انتقال
۲۵	۱.۴۲	۱۵۴۰	۳۵۰	۳۶۰	۱۰۰
۳۰	۱.۴۵	۱۵۴۸	۳۶۰	۳۸۰	۱۰۰
۶۰	۱.۵۲	۱۵۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۱۰۰
۸۰	۱.۵۵	۱۵۵۰	۶۰۰	۶۸۰	۸۰
۱۰۰	۱.۵۸	۱۵۵۲	۶۰۰	۶۸۰	۸۰
۱۵۰	۱.۶۲	۱۵۵۶	۸۰۰	۷۰۰	۷۵
۲۰۰	۱.۶۸	۱۵۵۸	۶۶۰	۸۵۰	۹۵

تابه حال تحقیقات بسیاری بر روی حسگرهای نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی انجام پذیرفته است که هرکدام از آن‌ها دارای ویژگی و مزایای خاص خود هستند. در جدول ۳ به منظور مقایسه بهتر، تعدادی از این مقالات و همچنین نتایج آن‌ها در پارامترهای متفاوتی از جمله ضریب انتقال، ضریب کیفیت و همچنین نوع ثابت شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود ساختار طراحی شده دارای نتایج بهتری در پارامترهای مورد مقایسه است.

جدول ۳: مقایسه ساختارهای طراحی شده با دیگر ساختارهای ارایه شده.

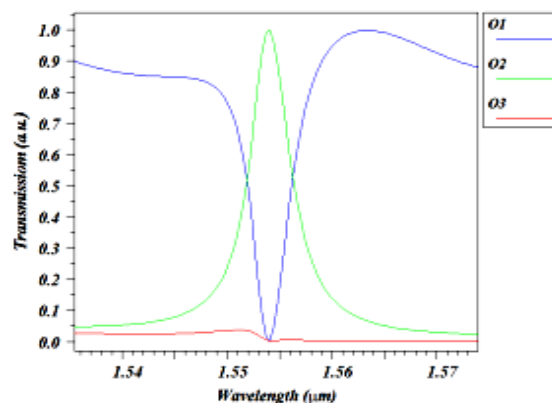
مرجع	ثابت شبکه	طول موج مرکزی (nm)	ضریب انتقال (%)	ضریب کیفیت	اندازه ساختار (μm^2)
ساختار طراحی شده بدون اثرات پلاسمونیک	مربعی	۱۵۵۴	۱۰۰	۴۸۵	۲۳۵
ساختار طراحی شده با استفاده از اثرات پلاسمونیک	مربعی	۱۵۵۴	۱۰۰	۸۵۰	۲۳۵
[۸]	مربعی	۱۶۴۴.۷	۱۰۰	۲۰۵۵	۱۵۲.۷
[۹]	مربعی	۱۵۷۸	۱۰۰	۵۰۲	۱۸۹.۶
[۱۰]	مثلثی	۱۵۵۱.۳	۶۸	۱۵۳.۶	-
[۱۱]	مربعی	۱۵۵۱	۹۰	۳۸۷	۲۴۲.۴
[۱۲]	مربعی	۱۵۵۰	۱۰۰	۳۴۴	-
[۱۳]	مربعی	۱۵۵۰	۱۰۰	۲۲۱	-
[۱۴]	مربعی	۱۴۹۱.۳	۱۰۰	۱۱۴.۶	۱۲۹.۹
[۱۵]	مثلثی	۱۵۶۴.۴	۵۵	۴۲۳	-

۶. نتیجه‌گیری

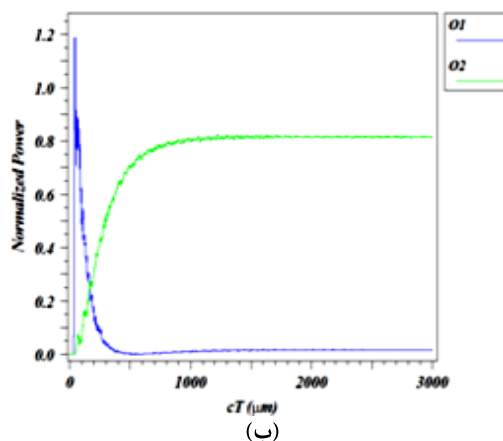
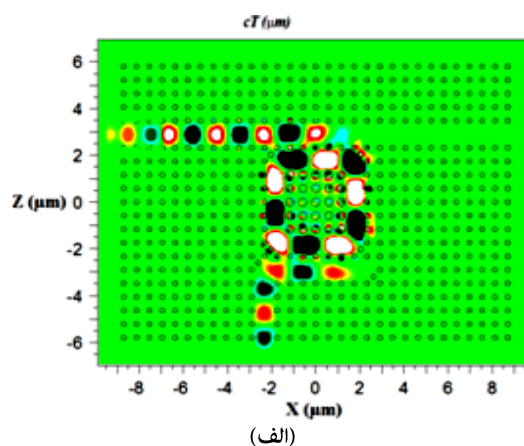
در این مقاله یک نانوحسگر زیستی پلاسمونیک مبتنی بر تشدیدگر حلقوی بلور فوتونی جهت تشخیص غلظت گلوکز طراحی شد.

در استفاده از ساختار موج‌بری بلور نوری به عنوان حسگر، در عمل با تغییر ماده مورد اندازه‌گیری، ضریب شکست آن تغییر می‌کند. تغییر ضریب شکست ماده در نحوه انتشار پالس اثر گذاشته و با اندازه‌گیری طول موج تشدید در ساختار موج‌بر، که

طول موج ۱۵۵۴ nm نشان داده شده است که در پورت O2، ۸۰٪ است این در حالی است که مقدار آن در سایر خروجی‌ها ۰٪ است.



شکل ۷: طیف خروجی ساختار حسگر نوری با استفاده از موج‌بر خروجی عمودی با یک پورت خروجی.



شکل ۸. (الف) نحوه انتقال و تفکیک و (ب) میزان توان نرمالیزه شده در طول موج ۱۵۵۴ nm.

ضریب شکست، طول موج رزونانس، حساسیت، ضریب کیفیت و ضریب انتقال حسگر در غلظت‌های متفاوت گلوکز در جدول ۲ ارایه شده است.

- [7] S. Olyaei, A. Naraghi, and V. Ahmadi, "High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring," *Optik*, vol. 125, no. 1, pp. 596-600, 2014.
- [8] Z. Rashki and S. J. S. M. Chabok, "Novel design of optical channel drop filters based on two-dimensional photonic crystal ring resonators," *Optics Communications*, vol. 395, pp. 231-235, 2017.
- [9] R. Bendjelloul, T. Bouchemat, and M. Bouchemat, "An optical channel drop filter based on 2D photonic crystal ring resonator," *Journal of Electromagnetic Waves and applications*, vol. 30, no. 18, pp. 2402-2410, 2016.
- [10] P. Andalib and N. Granpayeh, "Optical add/drop filter based on dual curved photonic crystal resonator," in *2008 5th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 2008: IEEE, pp. 249-250.
- [11] H. Alipour-Banaei, M. Jahanara, and F. Mehdizadeh, "T-shaped channel drop filter based on photonic crystal ring resonator," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 18, pp. 5348-5351, 2014.
- [12] F. Mehdizadeh, H. Alipour-Banaei, and S. Serajmohammadi, "Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator," *Journal of Optics*, 15, 7, 075401, (2013)
- [13] S. Rezaee, M. Zavvari, and H. Alipour-Banaei, "A novel optical filter based on H-shape photonic crystal ring resonators," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126, 2535-2538, (2015).
- [14] S. Robinson and R. Nakkeeran, "Coupled mode theory analysis for circular photonic crystal ring resonator-based add-drop filter," *Optical Engineering*, 51, 114001-114001, (2012).
- [15] F.-L. Hsiao and C. Lee, "A nano-ring resonator based on 2-D hexagonal-lattice photonic crystals," in *Optical MEMS and Nanophotonics, 2009 IEEE/LEOS International Conference on*, IEEE, 107-108, (2009).

با تغییر ماده مورد اندازه‌گیری و مشخصات موج‌بر بلور نوری تغییر می‌کند، می‌توان عملیات اندازه‌گیری را انجام داد. نخست به ساختار یک نانوحسگر که شامل دو موج‌بر افقی و یک تشدیدگر حلقوی بین دو موج‌بر است، پرداخته شد. تشدیدگر حلقوی استفاده‌شده در این حسگر از نوع مربعی است که با افزایش شعاع میله‌های داخلی تشدیدگر و قرار دادن ۴ عدد میله‌های پراکندگی در آن ایجاد شده است. به‌منظور انعطاف‌پذیری ساختار طراحی‌شده و همچنین کاربردی بودن آن به ایجاد تغییراتی در موج‌برهای خروجی ساختار پرداختیم. موج‌بر خروجی افقی با ایجاد تغییرات به یک موج‌بر عمودی خروجی تبدیل شد. در ساختار نخست، بدون اعمال اثرهای پلاسمونیک، فاکتور کیفیت در حدود ۴۸۵ به‌دست آمده که نسبت به سایر ساختارها با رزوناتورهای متفاوت بهتر است. با انتخاب میله‌های پراکندگی از جنس طلا، فاکتور کیفیت در حدود ۸۵۰ می‌شود، که به‌دلیل اعمال اثرهای پلاسمونیک در ساختار، ارتقا داشته است. در این ساختار میانگین ضریب انتقال در حدود 100% و حساسیت حدود 660nm/RIU است.

۷. منابع

- [1] D. R. Thévenot, K. Toth, R. A. Durst, and G. S. Wilson, "Electrochemical biosensors: recommended definitions and classification," *Biosensors and bioelectronics*, 16, 121-131, (2001).
- [2] S. Robinson and N. Dhanlaksmi, "Photonic crystal based biosensor for the detection of glucose concentration in urine," *Photonic Sensors*, 7, 11-19, (2017).
- [3] V. Dinesh, "Analysis and simulation of photonic crystal components for optical communication," *PhD Dissertation*, (2003).
- [4] N. F. Areed, M. F. O. Hameed, and S. Obayya, "Highly sensitive face-shaped label-free photonic crystal refractometer for glucose concentration monitoring," *Optical and Quantum Electronics*, 49, 5, (2017).
- [5] T. Suganya and S. Robinson, "2D Photonic crystal based biosensor using rhombic ring resonator for glucose monitoring," *ICTACT J Microelectron*, 3, 349-4, (2017).
- [6] B. Mounir, C. Haouari, A. Saïd, and A. Hocini, "Analysis of highly sensitive biosensor for glucose based on a one-dimensional photonic crystal nanocavity," *Optical Engineering*, 58, 027102, (2019).