

طراحی و شبیه‌سازی نانوحسگر مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی برای اندازه‌گیری فشار

پردیس کاظمی اسفه، زهرا اعلایی*

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

چکیده

در این مقاله، یک نانوسنور مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی برای اندازه‌گیری فشار طراحی و شبیه‌سازی شده است که عملکرد آن براساس تغییرات ضریب شکست سیلیکون و طول موج رزونانس است. این نانوحسگر برای اندازه‌گیری فشار در گستره ۰ تا ۸ GPa پیشنهاد شده است. برای تشخیص گستره طول موج رزونانس حسگر فشار، در محاسبه شکاف باند فوتونی از روش بسط امواج تخت و همچنین برای به دست آوردن پارامترهای عملیاتی حسگر از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان استفاده شده است. مقدار حساسیت و فاکتور کیفیت نانوحسگر فشار طراحی شده به ترتیب برابر ۸ nm/GPa و ۹۹۵/۵۵ است. ساختار حسگر به علت سایز کوچک و فشرده، مناسب برای استفاده در صنعت نانوالکترو مکانیک نوری و فناوری‌های نانو است.

واژه‌های کلیدی: حسگر نوری، حسگر فشار، فوتونیک کریستال، فاکتور کیفیت، حساسیت.

ایمیل نویسنده مسئول: alaie.zahra@yahoo.com

۱- مقدمه

با اختراع حسگر نوری توسط کلارک و لیون در سال ۱۹۶۲، حسگر نوری در زمینه‌های کنترل صنعتی، نظامی، نظارت بر محیط زیست و پزشکی مورد توجه قرار گرفتند. فوتونیک کریستال‌ها (PhC)^۱ از جمله مناسب‌ترین بسترها برای طراحی حسگرهای نوری با حساسیت بالا هستند [۱] که دارای یک ویژگی مهم‌اند، که در آن حالت انتشار الکترومغناطیس به علت انعکاس به‌طور کامل صفر است و به آن شکاف باند فوتونی (PBG)^۲ می‌گویند. شکاف باند فوتونی طیف وسیعی از فرکانس‌ها است که به نور اجازه انتشار را نمی‌دهد. فوتونیک کریستال‌ها برای طراحی سیستم‌های متفاوت نوری مانند فیلترها [۲]، دروازه‌های منطقی [۳]، دی مالتی پلکسرها [۴] و حسگرها [۵-۶] استفاده می‌شود. به ویژه حسگرهای نوری فوتونیک کریستالی که با توجه به اندازه بسیار کوچک، حساسیت بالا، ایمنی به تداخل الکترومغناطیسی و پاسخ سریع، در تحقیقات و جامعه علمی جذاب تر هستند [۷].

حسگر یک دستگاه تحلیلی است که پارامترهای فیزیکی و همچنین، پارامترهای زیستی را حس کرده و با توجه به آن‌ها پاسخ می‌دهد. در گذشته، حسگرهای متفاوت الکترونیکی بسیاری طراحی شدند، اما این حسگرها محدودیت‌هایی دارند، که این محدودیت‌ها با حسگرهای نوری از بین می‌رود. حسگرهای نوری با استفاده از فوتونیک کریستال‌ها، فیبر فوتونیک کریستالی و فیبر نوری طراحی شده‌اند [۸]. حسگرهای نوری در کاربردهای گسترده‌ای برای سنجش پارامترهای مختلف مانند فشار، دما، چرخش، ضریب شکست و گاز شیمیایی استفاده شده است [۹]. اندازه‌گیری فشار به طور گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، کنترل خطرات صنعت پتروشیمی، ایمنی صنعتی و زیست پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰ و ۱۱]. در سال‌های اخیر، حسگرهای مبتنی بر فوتونیک کریستال بسیاری برای تشخیص میدان‌های الکتریکی [۱۲]، گاز [۱۳]، سلول‌های سرطانی [۱۴]، غلظت گلوکز [۱۵ و ۱۶]، اجزای خون [۱۷]، مولکول‌های DNA [۱۸]، شوری آب دریا [۱۹]، فشار [۲۰]، دما [۲۱ و ۲۲] و در بسیاری از کاربردهای دیگر، طراحی شدند [۷]. در مقالات، بسترهای حسگر نوری مبتنی بر فوتونیک کریستال‌های دوبعدی می‌تواند با نانوکاوک‌های متصل شده به موجبرها، رزوناتورهای حلقوی

¹ Photonic Crystal

² Photonic Band Gap

$$(۱) \begin{bmatrix} n_{xx} \\ n_{yy} \\ n_{zz} \\ n_{yz} \\ n_{xz} \\ n_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_0 \\ n_0 \\ n_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_1 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_2 & c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

که در آن n_{ij} ضریب شکست در جهت ij ، n_0 ضریب شکست در حالت بدون فشار و σ_{ij} فشار در جهت ij است. عملکرد حسگر فشار مبتنی بر تغییرات ضریب شکست مواد به دلیل اثرات فوتوالاستیک است. با اعمال فشار هیدرواستاتیک بر سطح حسگر، ضریب شکست ماده تغییر خواهد کرد که باعث تغییر شکاف باند و طول موج رزونانس ساختار فوتونیک کریستالی می‌شود. رابطه بین ضریب شکست و فشار هیدرواستاتیکی به صورت زیر است [۲۶]:

$$(۲) \quad n = n_0 - (c_1 + 2c_2)\sigma$$

که c_1 و c_2 از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(۳) \quad c_1 = \frac{n_0^3 (p_{11} - 2Vp_{12})}{2E}$$

$$(۴) \quad c_2 = \frac{n_0^3 [p_{12} - V(p_{11} + p_{12})]}{2E}$$

که n_0 ضریب شکست سیلیکون در فشار صفر (۰ GPa)، σ فشار هیدرواستاتیک اعمال شده به سطح حسگر، V نسبت پواسون، E مدولاسیون یانگ و c ثابت استرس-اپتیک است. فشار هیدرواستاتیک اعمال شده به صورت خطی با ضریب شکست سیلیکون افزایش می‌یابد. با افزایش هر ۱ GPa فشار، ضریب شکست سیلیکون ۰.۳۹۸۵٪ افزایش می‌یابد [۲۷]. روش‌های عددی برای تحلیل دو بعدی حسگر شامل FDTD و PWE است. دو روش سنجش، تغییرات شدت و تغییرات طول موج رزونانس، برای تشخیص وجود دارد. در مقایسه با تغییرات شدت، تغییر طول موج رزونانس حساسیت بالاتری را فراهم می‌کند، بنابراین ما در این مقاله با استفاده از نرم افزار RSOFTE از تغییرات طول موج رزونانس استفاده می‌کنیم.

[۲۵-۲۴-۲۳-۱۶] و موجیر [۲۲ و ۲۱] ایجاد شوند. نانوکاوک‌ها محدوده گسترده‌ای از پارامترهای حسگر را ارائه می‌دهند، اما به دلیل متصل نشدن مناسب با موجیر، بازده انتقال آن‌ها کاهش می‌یابد [۷۶]. نانوحسگرهای مبتنی بر موجیرهای فوتونیک کریستالی دارای راندمان انتقال بالاتری هستند، اما فاکتور کیفیت بسیار کمی دارند [۱۵]. نانوحسگرهای مبتنی بر رزوناتورهای حلقوی، بازده بالایی را ارائه می‌دهند. تاکنون، بسیاری از حسگرهای فشار مبتنی بر فوتونیک کریستال‌های دو بعدی به صورت تئوری و آزمایشگاهی طراحی شده‌اند [۷]. در این مقاله، ما یک نانوحسگر مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی، برای تشخیص فشار در گستره ۰.۳ GPa تا ۸ GPa طراحی کرده‌ایم. در ادامه، ساختار مقاله به شرح زیر خواهد بود: در بخش دوم به بیان اصول سنجش فشار می‌پردازیم. در بخش سوم، ساختار شکاف باند فوتونی با استفاده از روش تحلیل دوبعدی بسط امواج تخت (PWE) [۴]، ارائه خواهد شد. در بخش چهارم به طراحی بستر نانوحسگر فشار مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی خواهیم پرداخت. در بخش پنجم و ششم به تحلیل و شبیه سازی برای به‌دست آوردن حالت‌های هدایت حسگر با روش PWE و مقدار پارامترهای عملیاتی با روش دوبعدی تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) [۵] پرداخته و در آخر مقاله را با بخش نتیجه‌گیری به پایان می‌رسانیم.

۲- اصول سنجش حسگر فشار فوتونیک کریستالی

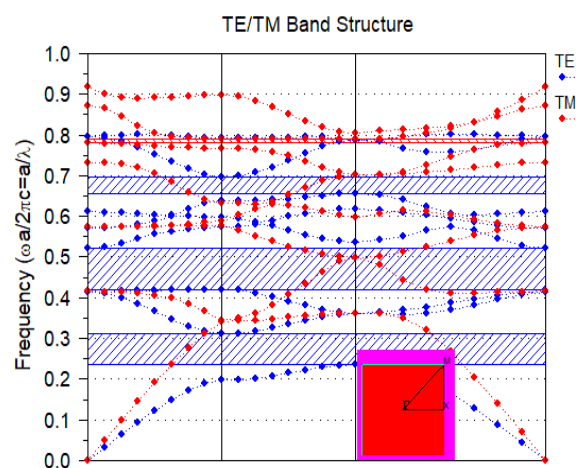
در این قسمت، تغییرات ساختار و تغییرات ضریب شکست بر اثر فشار اعمال شده را محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه ضریب شکست ساختار، از ضرایب تانسور نوری برای سیلیکون که در معادله تانسور تنش-نوری توصیف شده، استفاده می‌کنیم [۲۶]:

³ Gigapascal

⁴ Plane Wave Expansion

⁵ Finite Difference Time Domain

بریلوئن در ساختار کامل و بدون نقص محاسبه می‌شود و در شکل به طور واضح نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار شکاف باند فوتونی ساختار پیشنهادی.

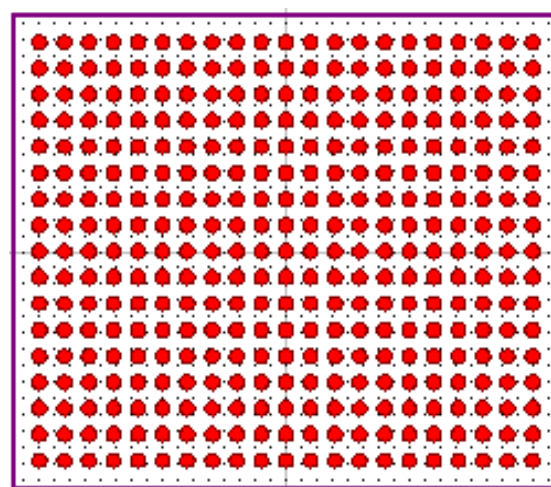
جدول ۱. فرکانس و طول موج ساختار باند، بستر حسگر پیشنهادی.

شکاف باند فوتونی	فرکانس (a/λ)	طول موج (λ) (nm)
PBG 1:TM	۰/۷۸۰ - ۰/۷۸۹	۱۰۲۵ - ۱۰۱۳
PBG 2:TE	۰/۶۵۶ - ۰/۶۹۵	۱۱۵۱ - ۱۲۱۹
PBG 3:TE	۰/۴۲۱ - ۰/۵۲۰	۱۵۳۸ - ۱۹۰۰
PBG 4:TE	۰/۲۳۶ - ۰/۳۱۰	۲۵۸۰ - ۳۳۸۹

۴- طراحی بستر حسگر فشار مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی
شکل (۳) بستر حسگر فشار پیشنهادی طراحی شده را نشان می‌دهد، که توسط نقص های خطی و نقطه ای در آن، دو موجبر (شبه موجبر) و یک رزوناتور حلقه مربعی در شبکه مربعی فوتونیک کریستالی، ایجاد شده است. به طور کلی، نقص نقطه برای ایجاد حفره فوتونیک کریستالی و نقص خط برای ایجاد موجبر فوتونیک کریستالی استفاده می‌شوند.

۳- ساختار شکاف باند فوتونی

بستر حسگر فشار پیشنهاد شده در این مقاله، مبتنی بر فوتونیک کریستال های دو بعدی با یک شبکه مربعی از میله های دایره ای در هوا است. با توجه به شکل (۱)، ساختار کامل و بدون نقص فوتونیک کریستالی از میله های سیلیکونی 21×17 در جهت X-Z تشکیل شده است. فاصله مرکز بین میله های مجاور یا ثابت شبکه $a = 800 \text{ nm}$ است. میله های دایره ای دارای شعاع $r = 240 \text{ nm}$ و ضریب شکست آن ها $n = 3/42$ است.



شکل ۱. ساختار کامل فوتونیک کریستالی حسگر پیشنهادی.

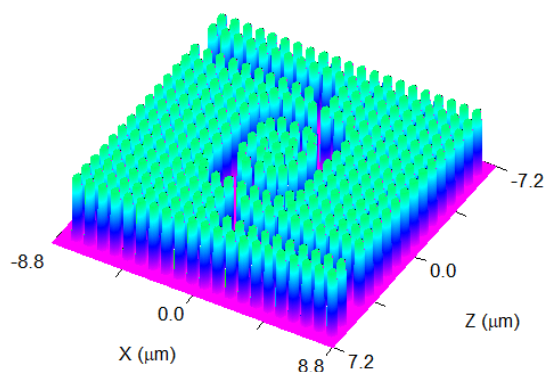
با استفاده از روش PWE، می‌توان شکاف باند فوتونی و حالت های انتشار را به دست آورد، در ساختار باندی بستر این حسگر فشار پیشنهادی، سه شکاف باند TE^۶ و یک شکاف باند TM^۷ وجود دارد، که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مقادیر شکاف باندهای فوتونی این نمودار به طور دقیق در جدول ۱ آورده شده است.

در این مقاله، ما از شکاف باند فوتونی دوم استفاده می‌کنیم، زیرا متعلق به پنجره ی سوم نوری است و دارای تلفات و پاشندگی کمتری می‌باشد، بنابراین برای طراحی حسگر مناسب است. محور عمودی این نمودار نشان دهنده بردار فرکانس و محور افقی نشان دهنده بردار موج است، که بردار فرکانس با رابطه $\omega a/2\pi c = a/\lambda$ به دست می‌آید، و در آن ω فرکانس، a ثابت شبکه، c سرعت نور و λ طول موج است، همچنین، بردار موج با توجه به ناحیه

^۶ Transverse electric

^۷ Transverse magnetic

شکل، اندازه سطح کل ساختار $15/4 \mu\text{m} \times 17/6 \mu\text{m}$ است.

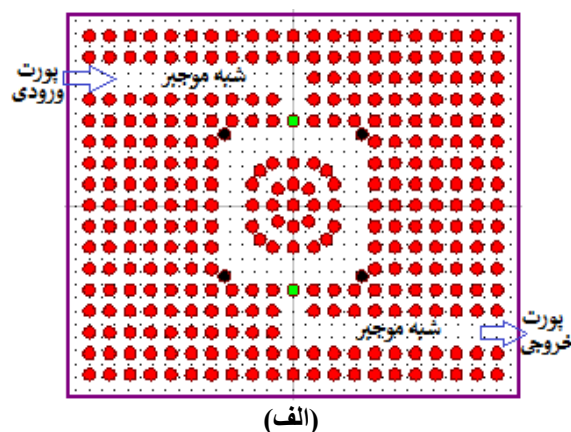


شکل ۴. ساختار سه بعدی حسگر فشار پیشنهادی.

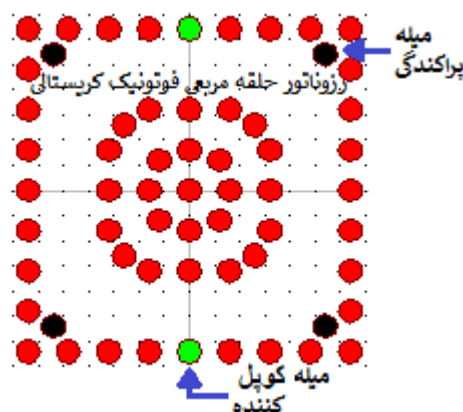
۵. بررسی حالت‌های هدایت

حسگر نوری مبتنی بر نانو ساختارها با استفاده از ساختارهای فوتونیک کریستالی تحقق می‌یابد و شدت جریان سیگنال نور را درون خود به دلیل داشتن ویژگی شکاف باند فوتونی کنترل می‌کند و اجازه عبور نمی‌دهد که با معرفی نقص خط و یا نقص نقطه در ساختار کامل فوتونیک کریستالی می‌توان حالت‌هایی برای هدایت سیگنال نور درون ساختار را فراهم کرد [۷]. هنگامی که نقص‌ها در یک ساختار کامل فوتونیک کریستالی وارد می‌شوند، تمام یا قسمتی از شکاف باندهای فوتونی ساختار تبدیل به حالت هدایتی می‌شوند.

در شکل (۵) فرکانس حالت‌های هدایت شده در شکاف باند سوم TE، به صورت مقطعی نشان داده شده است. همچنین الگوی شدت سیگنال متناظر آن در هر حالت نشان داده شده است. فرکانس‌های چهار حالت هدایت شده به ترتیب برابر با a/λ و $0/422$ ، $0/454$ ، $0/497$ ، $0/504$ است. الگوی سیگنال در حالت ۱، حالت ۲ و حالت ۴ به عنوان رزونانس OFF در نظر گرفته می‌شود زیرا که سیگنال نور در رزوناتور به شدت محدود نشده است و دارای فاکتور کیفیت بسیار کمی است.



(الف)



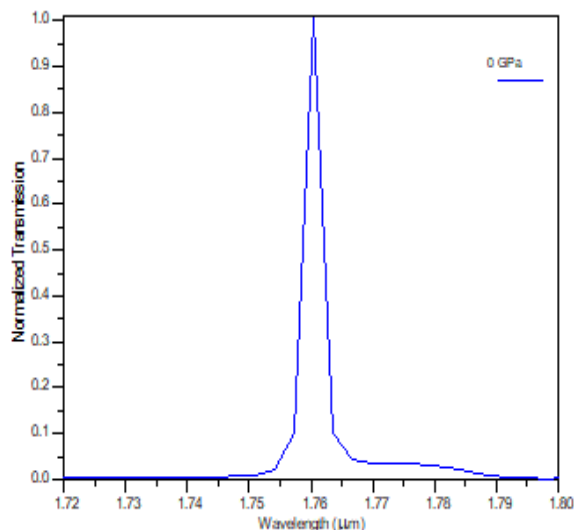
(ب)

شکل ۳. (الف) شمای کلی ساختار حسگر فشار مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی در شبکه مربعی فوتونیک کریستالی. (ب) رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی.

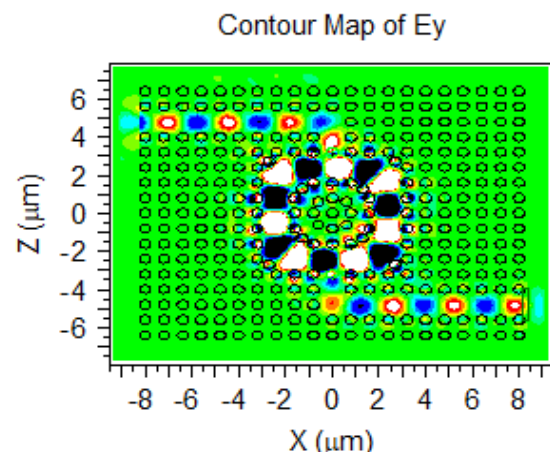
هر کدام از موجبرها با حذف ۱۱ میله سیلیکونی در راستای افقی و حذف ۱ میله در راستای عمودی ایجاد شده اند. رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی نیز با حذف برخی از میل‌های داخلی ایجاد می‌شود. میل‌های سبز رنگ که میل‌های کوپل کننده نامیده می‌شوند در مرز میان رزوناتور و موجبرهای ورودی و خروجی قرار دارند. این میل‌ها برای اتصال سیگنال نور از موجبر ورودی به رزوناتور و انتقال آن به موجبر خروجی استفاده می‌شود.

در رزوناتور، میل‌های داخلی به سمت مرکز تغییر مکان داده‌اند تا یک شکل دایره ای ایجاد کنند. همچنین، به منظور بهبود راندمان طیف انتقال، میل‌هایی با رنگ سیاه، در هر گوشه از چهار طرف میل‌های رزوناتور حلقه مربعی قرار داده شده است و میل‌های پراکندگی نام دارند. در شکل (۴) بستر حسگر فشار فوتونیک کریستالی طراحی شده به صورت سه بعدی نشان داده شده است و با توجه به

موج رزونانس در رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی $1760/4 \text{ nm}$ و بازده انتقال 100% است. همچنین، توزیع میدان الکتریکی در این طول موج رزونانس در شکل (۷) نشان داده شده است.



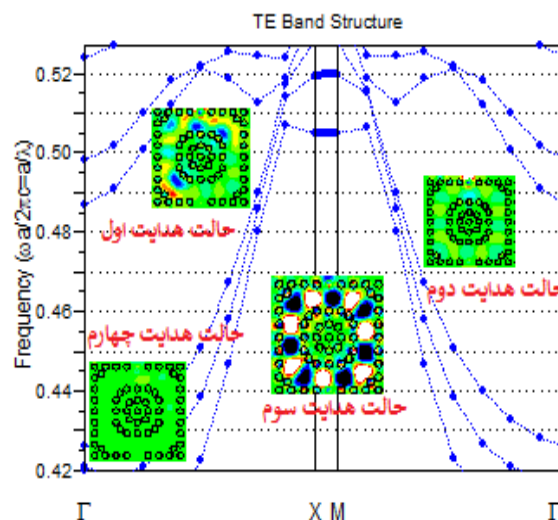
شکل ۶. طیف رزونانس خروجی نرمالیزه شده، بدون اعمال فشار.



شکل ۷. توزیع میدان الکتریکی در طول موج $1760/4 \text{ nm}$.

عملکرد حسگر با پارامتری به نام فاکتور کیفیت به دست می آید:

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (5)$$



شکل ۵. حالت های هدایتی ایجاد شده در شکاف باند TE حسگر فشار مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی.

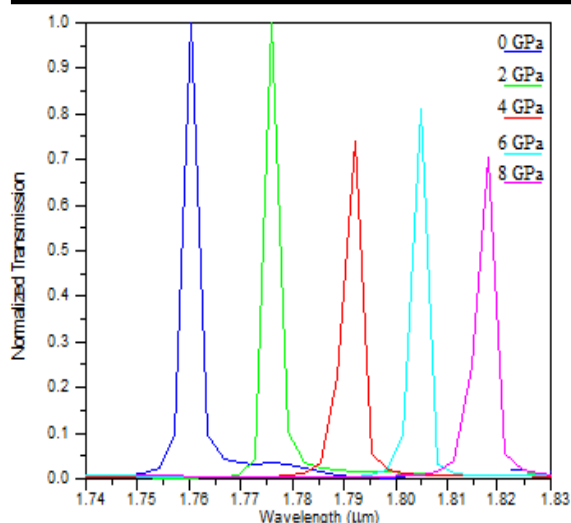
در حالت هدایت ۳، سیگنال نور به شدت درون رزوناتور حلقه محصور شده است، در نتیجه این حالت دارای فاکتور کیفیت خوبی است. بنابراین، برای اندازه گیری فشار مناسب است و فرکانس نرمالیزه آن از $0.439 a/\lambda$ تا $0.456 a/\lambda$ متغیر است که معادل طول موج $1760/4 \text{ nm}$ تا $1752/3 \text{ nm}$ است. تغییر حالت هدایت شده در فشارهای مختلف به طور عمده با اثر فوتوالاستیک (فشار) ایجاد می شود.

۶- بررسی پارامترهای عملیاتی

سیگنال گوسی نور از پورت ورودی وارد موجبر ورودی می شود، سپس، در طول موج رزونانس در رزوناتور حلقه مربعی فوتونیک کریستالی محصور شده و سیگنال نور از موجبر خروجی وارد پورت خروجی می شود، طیف رزونانس خروجی نرمالیزه شده با مانیتور زمان با روش آنالیز FFT^۸ ثبت می شود.

با استفاده از روش FDTD، طیف رزونانس خروجی نرمالیزه ثبت شده با مانیتور زمان را با اعمال فشارهای متفاوت در گستره 0 تا 0 GPa مورد بررسی قرار می دهیم. در شکل (۶) طیف رزونانس خروجی نرمالیزه بدون اعمال فشار (0 GPa) نشان داده شده است، در این حالت طول

⁸ Fast Fourier transform



شکل ۸. طیف رزونانس خروجی نرمالیزه شده حسگر فشار پیشنهادی از ۰ GPa تا ۸ GPa.

ویژگی حسگر نوری مبتنی بر نانوساختارها با پارامتری به نام حساسیت فشار (S_p) مشخص می شود که نسبت تغییرات طول موج رزونانس طیف خروجی به تغییرات فشار هیدروستاتیک است [۷].

$$S_p = \frac{\Delta\lambda}{\Delta P} \quad (۶)$$

مقدار پارامترهای عملیاتی از جمله طول موج رزونانس، فاکتور کیفیت، بازده انتقال و حساسیت فشار در سطوح متفاوت فشار در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به جدول مقدار حداکثر فاکتور کیفیت، بازده انتقال و حساسیت فشار به ترتیب ۹۹۵/۵۵، ۱۰۰٪ و ۸ nm/GPa است.

جدول ۳. پارامترهای عملیاتی حسگر فشار پیشنهادی در سطوح مختلف فشار.

فشار (GPa)	ضریب شکست (RIU)	طول موج رزونانس (nm)	فاکتور کیفیت	بازده انتقال (%)	حساسیت فشار (nm/GPa)
۰	۳/۴۲	۱۷۶۰/۴	۵۸۶/۴	۱۰۰	
۲	۳/۴۹۹۷	۱۷۷۶/۴	۶۱۲/۵۵	۱۰۰	۸
۴	۳/۵۷۹۴	۱۷۹۲/۴	۹۹۵/۵۵	۷۳/۸۳	۸
۶	۳/۶۵۹۱	۱۸۰۶/۴	۸۲۰/۴۵	۸۱	۷
۸	۳/۷۳۸۸	۱۸۲۰/۴	۹۵۸/۱۰۷	۷۰/۵۶	۷

حسگر فشار پیشنهادی این مقاله با حسگرهای فشار پیشنهاد شده دیگر مقالات در جدول (۴) مقایسه شده است. این مقایسه نشان می دهد که حسگر فشار پیشنهادی این مقال عملکرد خوبی دارد.

که در آن λ طول موج رزونانس، $\Delta\lambda$ تغییرات طول موج در FWHM^۹ و Q فاکتور کیفیت است. اگر طول موج رزونانس بسیار تیز باشد به این معنا است که مقدار فاکتور کیفیت بالا است و این با به حداقل رساندن تلفات در حالت رزونانس به دست می آید [۱۶]. بنابراین، فاکتور کیفیت این حسگر پیشنهادی ۵۸۶/۴ است، که این مقدار از فاکتور کیفیت با فاکتور کیفیت حسگرهای مقالات قبلی در جدول ۲ مقایسه شده است.

جدول ۲. مقایسه مقدار فاکتور کیفیت حسگر این مقاله با حسگر دیگر مقالات.

مرجع مقالات	سال	نوع	فاکتور کیفیت
[۱۹]	۲۰۱۲	حسگر دما	۴۷۷/۸۳
[۲۷]	۲۰۱۴	حسگر فشار	۷۵/۵
[۱۵]	۲۰۱۶	حسگر زیستی	۵۴۹/۲
[۲۰]	۲۰۱۷	حسگر فشار	۲۶۵/۸۳
این مقاله	۲۰۱۹	حسگر فشار	۵۸۶/۴

۷- آنالیز اثرات فشار

در این قسمت اثر فشار اعمالی بر ساختار حسگر پیشنهادی را با افزایش فشار از ۰ GPa تا ۸ GPa مورد تحلیل قرار می دهیم و پارامترهای عملیاتی را محاسبه می کنیم. در شکل (۸) طیف رزونانس خروجی نرمالیزه در فشارهای متفاوت با افزایش ۲ GPa، نشان داده شده است. با افزایش فشار، طول موج رزونانس به نواحی بالاتر انتقال می یابد. مشاهده می شود که در گستره فشار، طیف رزونانس خروجی نرمالیزه ۶۰ nm تغییر کرده است.

^۹ Full width at half maximum

- [3] BR. Singh, S. Rawal, Optical Society of America A, 32(12), 2260–2263, (2015).
- [4] K. Venkatachalam, S. Robinson, SK. Dhamodharan, Opto-Electron Rev 25(2), 74–79. (2017).
- [5] RV. Nair, R. Vijaya, Prog Quant Electron 34(3), 89–134, (2010).
- [6] DF. Dorfner, T. Hürlimann, T. Zabel, LH. Frandsen, G. Abstreiter, Appl Phys Lett 93(18):181103, (2008).
- [7] R. Rajasekar, S. Robinson, Plasmonics, 14,1-13, (2018).
- [8] T. Dharchana, A. Sivanantharaja, S. Selvendran, Advances in Natural and Applied Sciences, 11(7):26–30, (2017).
- [9] L. Zhang, J. Lou, L. Tong Photon Sens 1(1), 31–42, (2011).
- [10] Y. Zhang, J. Huang, X. Lan, L. Yuan, H. Xiao, Opt Eng 53(6):067101, (2014).
- [11] H. Xu, M. Hafezi, J. Fan, JM. Taylor, GF. Strouse, Z. Ahmed, Opt Express 22(3), 3098–3104, (2014).
- [12] Y. Zhao, Y-n. Zhang, LV. Ri-Qing, J. Li, J Lightwave Technol 35(16), 3440–3446, (2017).
- [13] X. Qian, Y. Zhao, Y-n. Zhang, Q. Wang, Sensors Actuators B Chem 228,665–672, (2016).
- [14] S. Jindal, S. Sobti, M. Kumar, S. Sharma, M.K. Pal, IEEE Sensors Journal 16(10), 3705–3710, (2016).
- [15] M. Saleh, M. Farhat, M.F.O Hameed, N. Fayez, M. El-Okr, S. Obayya, Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 31. 836, (2016).
- [16] P. Sharma, P. Sharan. Int J Emerg Technol Adv Eng 4(1), 702–706, (2014).
- [17] H. Chopra, RS. Kaler, B. Painam, J Nanophotonics 10(3), 036011, (2016).
- [18] F.L. Hsiao, C. Lee, Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 10(1), 013001, (2011).
- [19] S. Robinson, R. Nakkeeran, Photon Sens 2(2), 187–192, (2012).
- [20] R. Arunkumar, T. Suganya, S. Robinson, Int J Photon Opt Technol 3(1):30–33, (2017).

جدول ۴. مقایسه حداکثر مقادیر پارامترهای عملیاتی حسگر فشار دیگر مقالات با این مقاله.

حساسیت فشار (nm/GPa)	بازده انتقال (%)	فاکتور کیفیت	گستره فشار (GPa)	مرجع مقالات
۲	۵۷/۵	۷۵/۵	۰ تا ۷	[۲۷]
۱/۵	۶۰	۱۵۰	۰ تا ۴	[۸]
.....	۱۰۰	۳۳۰/۸	۰ تا ۱۰	[۲۰]
۸	۱۰۰	۹۹۵/۵۵	۰ تا ۸	این مقاله

۸- نتیجه گیری

در این مقاله ما یک نانوحسگر فشار مبتنی بر رزوناتور حلقه مربعی را طراحی و شبیه سازی نمودیم که دارای وضوح تشخیص خوبی است. گستره اندازه گیری این حسگر ۰ GPa تا ۸ GPa است. با توجه به این که حسگر فشار طراحی شده بر اساس روش تغییر طول موج رزونانس است، با اعمال فشار، طول موج رزونانس به نواحی بالاتر انتقال می یابد. همچنین، با تغییر فشار بازده انتقال متغیر است. تغییرات ایجاد شده در طول موج رزونانس و بازده انتقال به دلیل تغییرات ضریب شکست در سطوح مختلف فشار است. بیشترین حساسیت، بازده انتقال و فاکتور کیفیت به دست آمده از حسگر فشار طراحی شده به ترتیب ۸ nm/GPa، ۱۰۰٪ و ۹۹۵/۵۵ است. اندازه سطح کل ساختار فشرده و برابر $15/4 \mu\text{m} \times 17/6 \mu\text{m}$ است. به دلیل این که حسگر در گستره نانومتری طراحی شده است، می تواند کوچکترین تغییرات بر اثر فشار اعمالی را حس کند. بنابراین، حسگر طراحی شده مناسب برای کاربرهای پزشکی و فناوری های نانو است.

منابع

- [1] S. Robinson, N. Dhanlaksmi, Photonic Sensors 7(1), 11–19, (2017).
- [2] S. Robinson, R. Nakkeeran, Optik, 123(5):451-457, (2011).

- [21] MT. Tinker, JB. Lee, Optics Express 13(18):7174–7188, (2005).
- [22] AK. Goyal, S. Pal, Optik 126(2):240–243, (2015).
- [23] B. Li, C. Lee, Sens Actuators A Phys 172(1):61–68, (2011).
- [24] F. Hu, H. Zhao, X. g. Qiao, Y. Li, D. Zhao, Z. Yong, Optoelectron Lett 7(6):419–422, (2011).
- [25] L. Huang, H. Tiana, D. Yang, J. Zhou, Q. Liu, P. Zhang, Y. Ji, Opt Commun 332 و 42–49, (2014).
- [26] M. Huang, Int J Solids Struct 40(7):1615–1632, (2003).
- [27] K.V. Shanthi, S. Robinson, Photon Sens 4(3),248–253, (2014).