

طراحی و شبیه‌سازی حسگر فشار مبتنی بر یک تیغه بلور فوتونی دو بعدی از جنس $PbMoO_4$

سعیده نوروزی^۱ کیازند فصیحی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه گلستان، گرگان- ایران

s71.norouzi@gmail.com

۲- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه گلستان، گرگان- ایران

k.fasihi@gu.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی سه بعدی (3D) یک حسگر^۱ فشار بلور فوتونی (PC) ارائه شده است. حسگر فشار پیشنهادی مبتنی بر یک تیغه بلور فوتونی دو بعدی از جنس $PbMoO_4$ است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش المان محدود^۲ (FEM) و تفاضل- محدود حوزه- زمان^۳ (FDTD)، توسط نرم افزار CST STUDIO SUITE و به صورت سه بعدی انجام شده است. حساسیت^۴ حسگر پیشنهادی نسبت به تغییر شکل هندسی و نیز تغییر ضریب شکست ناشی از اعمال فشار محاسبه شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی با اعمال یک فشار مشخص، هر دو عامل مورد بررسی، باعث کاهش طول موج تشدید طیف عبوری از ساختار می‌شوند. بین مقدار فشار اعمال شده به ساختار و جابه‌جایی طول موج تشدید یک رابطه خطی برقرار است. مقدار ضریب کیفیت^۵ قله تشدید طیف عبوری و نیز مقدار حساسیت حسگر فشار پیشنهادی به ترتیب عبارتند از 2.585 nm/GPa و 1040 .

واژه‌های کلیدی: حسگر فشار، تیغه بلور فوتونی، المان محدود، تفاضل- محدود حوزه- زمان، تغییر شکل هندسی، ضریب شکست، حساسیت، ضریب کیفیت

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۵/۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر کیازند فصیحی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- گرگان- خیابان شهید بهشتی- دانشگاه گلستان- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

در زمینه حسگرهای فشار بلور فوتونی دو و سه بعدی انجام شده، تاثیر تغییر ضریب شکست و تغییر شکل هندسی ساختار در اثر اعمال فشار به طور همزمان مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در تمامی موارد، ساختار حسگرهای فشار به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده و نتایج عملی که صحت نتایج شبیه‌سازی را تایید کند، گزارش نشده است. در سال 2004 یک گروه صربستانی تاثیر فشار بر روی یک بلور فوتونی دو بعدی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تغییر ضریب شکست و تغییر شکل هندسی ساختار بر اثر اعمال فشار به صورت دو بعدی شبیه‌سازی شده است. حساسیت ساختار در پژوهش مورد محاسبه قرار نگرفته است [۱۴]. در سال 2007 پتروزیلی و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی، تغییر ضریب شکست یک تیغه‌ی بلور فوتونی دو بعدی بر اثر اعمال فشار را مورد بررسی قرار دادند. حساسیت حسگر برابر 5.2 nm/GPa و ضریب کیفیت آن 7000 گزارش شده است [۱۵]. در سال 2010 یک گروه ژاپنی با همکاران هلندی خود یک حسگر بلور فوتونی دو بعدی حساس به کرنش با ضریب کیفیت 3500 و حساسیت 9 nm/GPa را برای حسگرهای مکانیکی طراحی و تولید کردند. در این پژوهش تغییر شکل ساختار و تغییر ضریب شکست بر اثر اعمال فشار مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱۸]. در سال 2011 همین گروه یک بلور فوتونی دو بعدی حساس به کرنش^۸ با ضریب کیفیت 4500 را برای حسگرهای مکانیکی طراحی و تولید کردند. در پژوهش فوق تنها تغییر شکل ساختار بر اثر اعمال فشار مورد بررسی قرار گرفته شد. از آنجایی که در عمل ضریب شکست در اثر اعمال فشار تغییر می‌کند، نتایج حاصل از ساختار شبیه‌سازی حسگر توسط این گروه، و نتایج حاصل از اعمال فشار به نمونه ساخته شده با هم مطابقت نداشتند [۱۶]. در سال 2012 آقای علیایی با بررسی تغییر ضریب شکست ناشی از اعمال فشار، یک حسگر فشار بلور فوتونی دو بعدی با حساسیت بالا 8 nm/GPa و ضریب کیفیت 1470 را طراحی و شبیه‌سازی کردند [۱۷].

در این مقاله تاثیر هر دو فاکتور تغییر ضریب شکست و تغییر شکل هندسی در اثر اعمال فشار بر روی ساختار حسگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ضمن برای انطباق نتایج شبیه‌سازی بر نتایج واقعی، بر خلاف پژوهش‌های پیشین، از شبیه‌سازی سه بعدی استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار CST انجام شده است. فشار به نحوی به ساختار اعمال شده که توزیع استرس و کرنش در کل ساختار یکنواخت باشد؛ در نتیجه ضریب شکست و شکل هندسی در کل ساختار به صورت یکنواخت تغییر می‌کند. تغییر شکل هندسی ساختار با روش المان محدود توسط نرم افزار CST MPHYSICS STUDIO و تغییر ضریب شکست با روش تفاضل- محدود حوزه- زمان توسط نرم افزار CST MICROWAVE STUDIO محاسبه شده است.

بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که ضریب شکست آنها در یک، دو و یا سه بعد با دوره تناوبی در حدود طول موج نور تغییر می‌کند؛ این تناوب در ضریب شکست باعث بوجود آمدن گاف فوتونی^۹ (یا باند توقف) در نمودار باند می‌شود که ویژگی بارز بلورهای فوتونی است. با استفاده از مواد با ضرایب شکست مختلف و تنظیم پارامترهای هندسی می‌توان ویژگی‌های گاف فوتونی را کنترل نمود. تغییر گاف فوتونی و ایجاد حالت‌های مجاز با وارد کردن نقص^۷ در ساختار امکان‌پذیر است که پایه کاربردهای فراوانی است. کاربرد بلورهای فوتونی در طول دهه‌ی گذشته به سرعت در حال گسترش بوده و از ساختارهایی چون موج‌بر، فیبر نوری، فیلتر نوری، کوپلرها، تشدیدگرها، مالتی‌پلکسرها و تاخیر دهنده‌ها گرفته، تا مواردی چون طراحی گیت‌های نوری، فلیپ فلاپ‌های نوری، ترانزیستورهای نوری و مدارهای مجتمع نوری را شامل می‌شود [۵-۱]. با توجه به حساسیت بالای طیف عبوری از ساختارهای بلور فوتونی به تغییر ضریب شکست نقایص نقطه‌ای و یا خطی، می‌توان از آنها در طراحی و پیاده‌سازی حسگرهای بیوشیمیایی و فیزیکی استفاده نمود [۹-۶]. اعمال فشار می‌تواند شکل ظاهری ساختار و همچنین ضریب شکست موج‌بر را بر اساس اثر فوتو-الاستیک تغییر دهد، که این تغییر منجر به تغییر عملکرد نوری ساختار می‌شود [۱۰]. برخی از پژوهش‌های مبتنی بر بلورهای فوتونی که برای طراحی حسگرهای فشار انجام شده عبارتند از حسگرهای فشار مبتنی بر آرایه نانو-سیم سیلیسیمی عمودی [۱۱]، حسگرهای فشار مبتنی بر بلورهای فوتونی فیبری [۱۲]، حسگرهای فشار مبتنی بر بلور فوتونی لایه-نازک [۱۳]، و حسگرهای فشار مبتنی بر بلورهای فوتونی دو و سه بعدی. در پژوهش مرجع [۱۱]، از ساختاری بلور فوتونی به صورت آرایه نانو-سیم سیلیسیمی عمودی قابل کنترل، ایجاد شده بر روی غشا از جنس Si/SiO_2 استفاده می‌شود. در اثر اعمال فشار هیدرواستاتیکی، غشا خمیده شده و دچار تغییر رنگ قابل اندازه‌گیری با سیستم‌های تصویربرداری می‌شود. دقت سیستم به قابلیت تفکیک سیستم تصویربرداری وابسته است. در مرجع [۱۲]، از حسگر مبتنی بر لوله سیلیسیمی که با استفاده از فیبرهای بلور فوتونی بهینه شده استفاده می‌شود. اساس عملکرد این حسگرها مبتنی بر ارزیابی تداخل-های فیبری-پرو متاثر از فشار، در فیبرهای نوری است. این حسگرها از دقتی مناسب برای اندازه‌گیری گستره‌ای بسیار محدود از کمیت فشار، با مقادیر بسیار اندک (در گستره چند صد کیلو پاسکال)، برخوردارند. مرجع [۱۳]، در واقع یک ساختار غشایی متشکل از پل-هوا و موج‌بر (نقص خطی) تیغه‌ای بلور فوتونی سیلیسیمی است. نشان داده شده است که استفاده از بلور فوتونی فیبر-نازک در غشا منجر به افزایش حساسیت حسگر می‌شود. این میان حسگرهای فشار مبتنی بر بلورهای فوتونی سه بعدی، از سادگی ساختار، قابلیت عملیاتی شدن و نیز دقتی بالا برخوردار هستند [۱۸-۱۴]. در پژوهش‌هایی که تاکنون

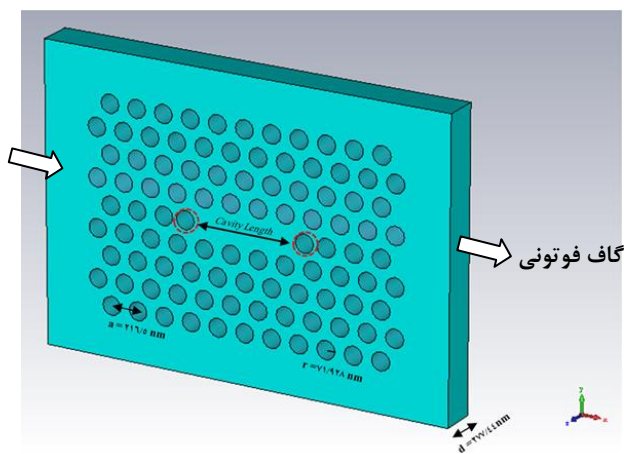
۲- طراحی کاواک بلور فوتونی

کاواک‌های بلور فوتونی با دارا بودن توانایی محدود کردن نور از اهمیت بالایی در زمینه‌های علوم و مهندسی برخوردارند. در سال‌های اخیر تمرکز بسیاری از مطالعات بر روی بهینه کردن هندسه کاواک بوده است. در این تحقیق برای برخورداری از کاواکی با ضریب کیفیت مناسب، و نیز سهولت در طراحی ساختار، از یک کاواک تعبیه شده در یک تیغه بلور فوتونی دو بعدی با آرایش مثلثی از حفره‌های هوا استفاده شده است (شکل ۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود با ایجاد نقیصی حاصل از برداشتن سه حفره میانی، یک کاواک بلور فوتونی ایجاد شده است [۱۲]. شعاع حفره‌ها $r=71.928 \text{ nm}$ ، ثابت شبکه $a=216.5 \text{ nm}$ و ضخامت ساختار $d=277.44 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است. جنس تیغه از PbMoO_4 است که در طول موج 633 nm دارای ضریب شکست 2.39 است [۱۰]. با جابه‌جایی دو حفره کناری مقدار ضریب کیفیت افزایش پیدا کرده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی طیف عبوری نشان داده شده در جدول (۱) ضریب کیفیت و نیز مقدار عبوردهی به‌ازای جابه‌جایی دو حفره کناری به اندازه $0.2a$ مناسب‌ترین مقدار را دارد.

طیف عبوری و انعکاسی از ساختار در شرایطی که هیچ فشاری به آن وارد نمی‌شود، در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس نتایج شکل فوق، ساختار پیشنهادی دارای طول موج تشدید در $\lambda = 634.4 \text{ nm}$ با ضریب کیفیتی معادل با $Q=1040$ است.

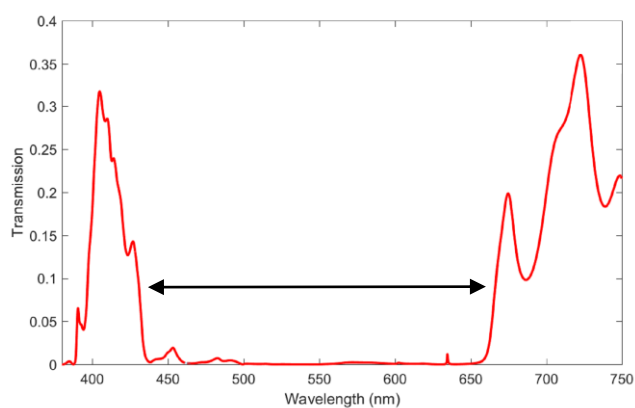
جدول (۱): مقدار ضریب کیفیت به ازای جابه‌جایی دو حفره کناری

مقدار جابه‌جایی	طول موج تشدید (THz)	عبوردهی	ضریب کیفیت (Q)
$0.14a$	633.41	0.00485	801.78
$0.16a$	633.78	0.0067	880.25
$0.18a$	634.11	0.00966	990.79
$0.2a$	634.4	0.0127	1040
$0.22a$	634.1	0.0088	700.22
$0.3a$	633.47	0.0069	359.92

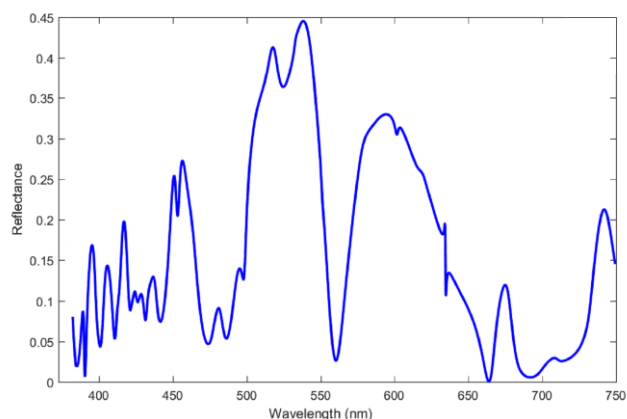


شکل (۱): ساختار تیغه بلور فوتونی دوبعدی،

شعاع حفره‌ها: $r=71.928 \text{ nm}$ ، ثابت شبکه: $a=216.5 \text{ nm}$ ضخامت لایه $d=277.44 \text{ nm}$ و دو حفره کناری به اندازه $0.2a$ جابه‌جا شده‌اند.



(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) طیف عبوری، (ب) طیف انعکاسی. ساختار حسگر

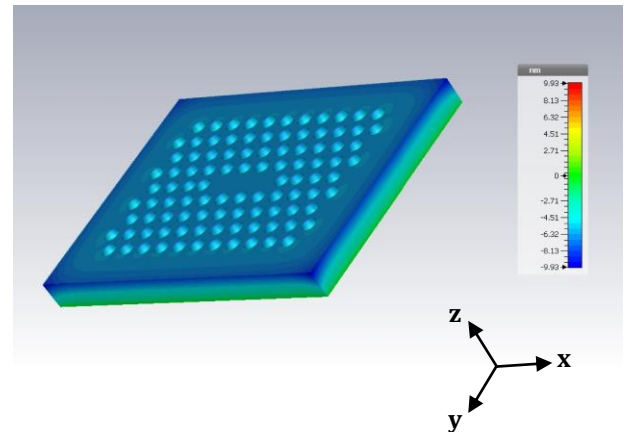
دارای یک قله تشدید در طول موج $\lambda = 634.4 \text{ nm}$ است

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

برای بررسی تاثیر اعمال فشار حسگر پیشنهادی، ابتدا تغییرات هندسی ساختار تیغه بلور فوتونی ناشی از اعمال فشار، با استفاده از نرم افزار CST MPM PHYSICS STUDIO مورد بررسی قرار گرفته، سپس تغییر ضریب شکست با استفاده از معادلات تئوری موجود محاسبه و سپس تغییرات طول موج تشدید طیف عبوری از ساختار با استفاده از نرم افزار CST MICROWAVE STUDIO مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مقدار ضریب کیفیت و حساسیت ساختار به ترتیب $Q=1040$ و -2.585 GPa/nm محاسبه شده است.

۳-۱- تغییر شکل ساختار بلور فوتونی

در حالت کلی با اعمال فشار به ساختار تیغه بلور فوتونی شاهد تغییراتی در شکل ظاهری ساختار و حفره‌های آن خواهیم بود. اما اگر فشار را به صورت عمود (در راستای \hat{a}_z ، صفحه زیرین ثابت فرض می‌شود) بر جهت انتشار نور به ساختار اعمال می‌کنیم؛ در این حالت کرنش به‌طور یکنواخت در ساختار توزیع شده و فقط در راستای Z شاهد تغییر شکل ساختار خواهیم بود. شکل (۳) نتایج شبیه‌سازی حاصل از اعمال فشار و نحوه توزیع آن در ساختار با استفاده از نرم افزار CST MPM PHYSICS STUDIO را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی ضخامت ساختار دچار تغییر شده (کاهش) و شعاع حفره‌ها تغییر چندانی ندارند.



شکل (۳): تغییر شکل ساختار حسگر در اثر اعمال فشاری معادل با 2 GPa در راستای \hat{a}_z

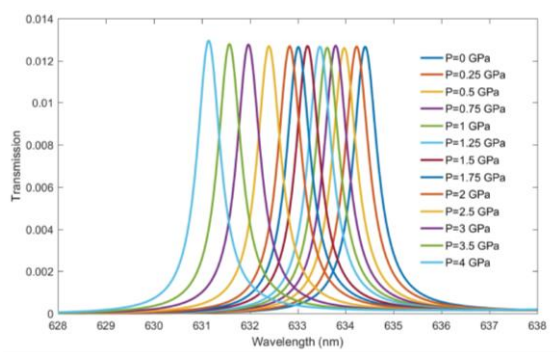
مقدار کرنش ایجاد شده ناشی از اعمال فشار، با استفاده از نرم افزار CST MPM PHYSICS STUDIO قابل محاسبه است، سپس با استفاده از رابطه‌ی (۱) مقدار تغییر ضخامت ساختار (Δd) در اثر اعمال فشار محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (1)$$

که در آن γ کرنش، Δd تغییرات طول و d_0 ضخامت اولیه ساختار است. جدول (۲) مقدار کرنش و ضخامت جدید ساختار به‌ازای اعمال مقادیر مختلف فشار را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی مکانیکی برای بررسی تاثیر فیزیکی اعمال فشار به ساختار با استفاده از نرم افزار ذکر شده، نیازمند ورود اطلاعات مکانیکی ماده مورد بررسی، از جمله ضرایب مدول یانگ^۱ و نسبت پواسن^{۱۱} آن است. مقادیر ضریب مدول یانگ و نسبت پواسن برای ماده PbMoO_4 به ترتیب 66 GPa و 0.35 هستند [۱۹]. شکل (۴) منحنی‌های طیف‌های تشدید ساختار تیغه بلور فوتونی به‌ازای اعمال مقادیر مختلف فشار، در حالتی که فقط تغییرات فیزیکی ناشی از تغییر شکل هندسی ساختار لحاظ شده باشد را نشان می‌دهد. با افزایش فشار طول موج تشدید به سمت مقادیر کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شود.

جدول (۲): مقدار کرنش و ضخامت ساختار به‌ازای مقادیر مختلف فشار

فشار (GPa)	کرنش $\gamma = \Delta d / d$	تغییر ضخامت $\Delta d = \gamma \times d_0$ (nm)	ضخامت جدید $d = d_0 - \Delta d$ (nm)
0	0	0	277.44
0.25	0.002392	0.67	276.77
0.5	0.0059295	1.65	275.79
0.75	0.008873	2.47	274.97
1	0.01171	3.26	274.18
1.25	0.01418	3.94	273.5
1.5	0.017705	4.92	272.52
1.75	0.02004	5.56	271.88
2	0.02365	6.57	270.87
2.5	0.0297	8.24	269.2
3	0.035	9.72	267.72
3.5	0.04093	11.36	266.08
4	0.04682	13	264.44



شکل (۴): جابه‌جایی طول موج تشدید ناشی از تغییر شکل هندسی ساختار

$$\begin{pmatrix} n_{xx} \\ n_{yy} \\ n_{zz} \\ n_{yz} \\ n_{zx} \\ n_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_0 \\ n_0 \\ n_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C_1 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_2 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

در معادله فوق $n_{xx}, n_{yy}, n_{zz}, n_{yz}, n_{zx}, n_{xy}$ ضرایب شکست هستند که تابعی از x, y و z اند، C_1, C_2, C_3 ثابت‌های نوری-تنش هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_1 = \frac{n_0^3 (p_{11} - 2\nu p_{12})}{(2E)} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{n_0^3 (p_{12} - \nu(p_{12} + p_{11}))}{(2E)} \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{n_0^3 p_{12}}{(2G)} \quad (6)$$

که p_{11}, p_{12} و p_{44} ثابت‌های نوری کرنش، E مدول یانگ، G مدول برشی^{۱۲} و ν نسبت پواسن است [۱۰].

اگر فشار به نحوی به ساختار تیغه بلور فوتونی اعمال شود که تنش به صورت غیر یکنواخت در ساختار توزیع شده و در نتیجه در جهات مختلف مقادیر متفاوتی داشته باشد، بر اساس معادله (۳) ضریب شکست هم در جهات مختلف مقادیر متفاوتی خواهد داشت. محاسبه تغییرات ضریب شکست در جهات مختلف، حتی با استفاده از برنامه‌های اختصاصی و سخت افزارهای قدرتمند کاری بسیار وقت‌گیر است. بنابراین ترجیحاً اعمال فشار به ساختار باید به گونه‌ای باشد که تنش به طور یکنواخت در ساختار توزیع شده و در جهات مختلف، مقادیری یکسان داشته باشد. در نتیجه با فرض تغییرات یکنواخت برای تنش، ضریب شکست هم تغییراتی یکسان و یکنواخت خواهد داشت. اگر فشار در یک جهت به عنوان مثال در جهت z به ساختار وارد شود، فقط در راستای z تنش (σ_{zz}) خواهیم داشت و در بقیه جهات مقدار تنش بسیار ناچیز و تقریباً برابر صفر است یعنی: ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = \sigma_{xy} = 0$). در این حالت، با توجه به معادله (۳)، ضرایب شکست از روابط زیر بدست می‌آیند:

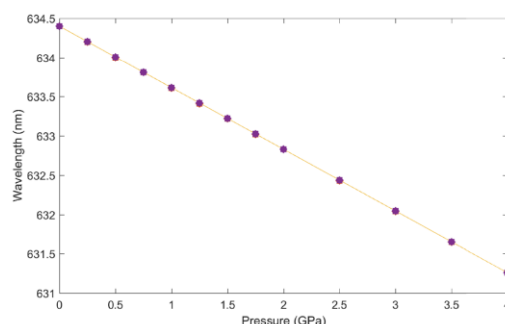
$$n_{xx} = n_0 - C_2 \sigma_{zz} \quad (7)$$

$$n_{yy} = n_0 - C_2 \sigma_{zz} \quad (8)$$

$$n_{zz} = n_0 - C_1 \sigma_{zz} \quad (9)$$

بنابراین با انجام با این کار، سه ضریب شکست در سه جهت مختلف خواهیم داشت. اگر از ماده $PbMoO_4$ که در آن $p_{11} = p_{12} = 0.24$ است استفاده کنیم [۱۰]، با توجه به روابط (۴) و

منحنی تغییرات طول موج تشدید به ازای مقادیر مختلف فشار اعمالی در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش فشار طول موج تشدید به صورت خطی کاهش می‌یابد.



شکل (۵): رابطه بین فشار و جابه‌جایی طول موج تشدید ناشی از تغییر شکل هندسی ساختار

حساسیت ساختار نسبت به تغییر شکل هندسی را می‌توان با کمک رابطه زیر به دست آورد که در واقع همان شیب منحنی شکل (۵) است [۲۰]:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta P} \left(\frac{nm}{GPa} \right) \quad (2)$$

پارامتر S حساسیت، $\Delta\lambda$ تغییرات طول موج بر حسب نانومتر و ΔP معرف تغییرات فشار است. با توجه به منحنی شکل (۵) مقدار حساسیت حسگر برابر است با:

$$S = \frac{632.83 - 634.4}{2 - 0} = -0.785 \text{ nm/GPa}$$

منفی بودن حساسیت ناشی از منفی بودن شیب منحنی در شکل (۵) است.

۳-۲- تغییر ضریب شکست ساختار بلور فوتونی

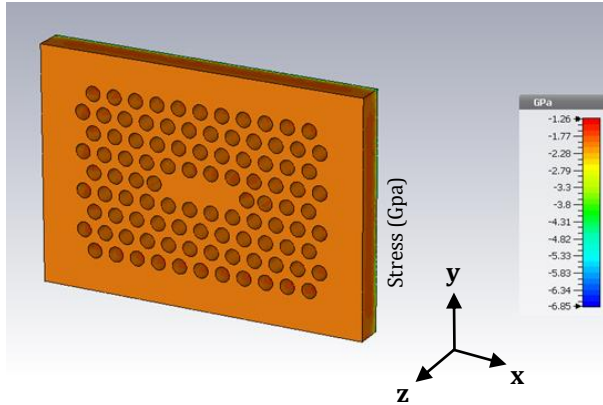
همان‌طور که در بخش قبل گفته شد در اثر اعمال فشار به ساختار علاوه بر تغییر شکل، ضریب شکست نیز تغییر می‌کند. فشار باید به نحوی به ساختار وارد شود که ضریب شکست به صورت یکنواخت در ساختار تغییر کند. از این رو در این پژوهش فشار در جهت عمود بر انتشار موج به ساختار وارد شده است. به دلیل اثر فوتو-الاستیک، ضریب شکست با تنش^{۱۱} تغییر می‌کند. تغییرات ضریب شکست بر حسب ضرایب استرس از معادله (۳) محاسبه می‌شود [۱۰] و در نهایت تاثیر تغییرات طیفی ناشی از تغییرات ضریب شکست توسط نرم افزار CST MICROWAVE STUDIO مورد بررسی قرار می‌گیرد.

(۵) برای ثابت‌های نوری- تنش داریم $C_1 = C_2 = 7.45 \times 10^{-12} / Pa$

و در نتیجه:

$$n_{xx} = n_{yy} = n_{zz} = n_0 - C_1 \sigma_{zz} \quad (10)$$

به این ترتیب پس از اعمال فشار، توزیع ضریب شکست در ساختار به صورت یکنواخت خواهد بود. در جدول (۳) و شکل (۳) ضریب شکست ساختار پس از اعمال مقادیر مختلف فشار، حاصل از معادله (۱۰)، نشان داده شده است. مقدار مربوط به تنش (σ_{zz}) از شبیه‌سازی ساختار با نرم افزار CST MPMYSICS STUDIO به دست آمده است. شکل (۷) نحوه توزیع تنش در اثر اعمال فشاری معادل 2GPa به ساختار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استرس به صورت یکنواخت در کل ساختار توزیع شده است.



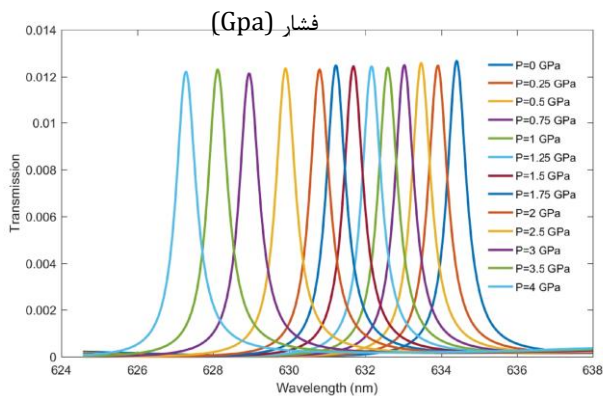
شکل (۷): توزیع استرس در ساختار به ازای اعمال فشار 2GPa در راستای \hat{a}_z

جدول (۳): تغییر ضریب شکست و تنش بر اثر اعمال فشار

فشار (GPa)	σ_{zz} (GPa)	ضریب شکست	$\epsilon_r = n^2$
0	0	2.39	5.7121
0.25	0.249975	2.3881	5.7032
0.5	0.499925	2.3862	5.6943
0.75	0.7502	2.3844	5.6824
1	1.00025	2.3825	5.6765
1.25	1.249	2.3806	5.6677
1.5	1.4985	2.3788	5.6588
1.75	1.75025	2.3769	5.6499
2	1.999	2.3751	5.6411
2.5	2.49875	2.3713	5.6234
3	3.002	2.3676	5.6056
3.5	3.50025	2.3639	5.5881
4	3.9985	2.3602	5.5705

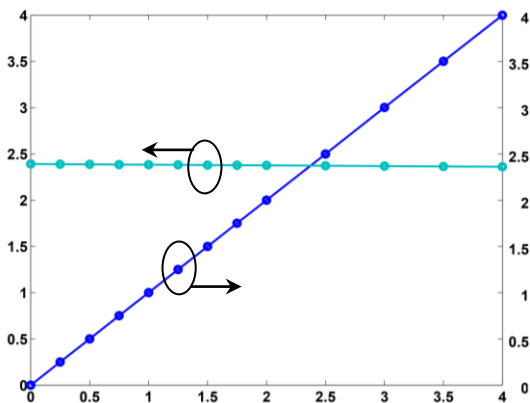
Refractive index

طیف عبوری از ساختار در اثر اعمال فشار، وقتی تنها ناشی از تغییر ضریب شکست است، در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فشار طول موج تشدید به سمت مقادیر کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شود.

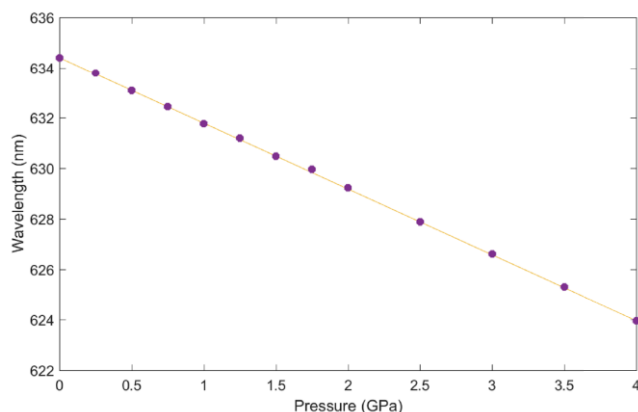


شکل (۸): جابه‌جایی طول موج تشدید ناشی از تغییر ضریب شکست ساختار بر اثر اعمال فشار

رابطه بین جابه‌جایی طول موج تشدید و مقادیر مختلف فشار اعمالی در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید با افزایش فشار طول موج تشدید به صورت خطی کاهش می‌یابد.



شکل (۹): منحنی‌های تغییر ضریب شکست و تنش بر اثر اعمال فشار



شکل (۱۱): رابطه بین فشار و جابه‌جایی طول موج تشدید ناشی از تغییر فاکتورهای ضریب شکست و شکل هندسی ساختار

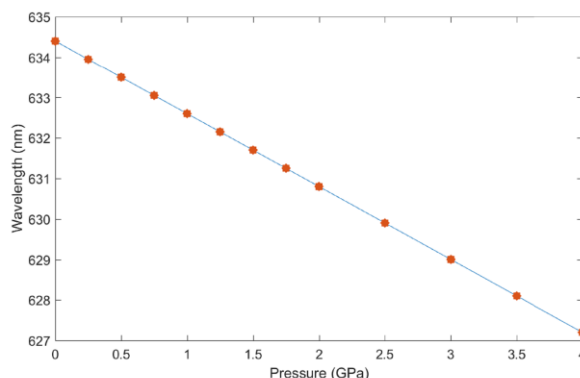
از این رو برای حسگر پیشنهادی مقدار حساسیت برابر است با:

$$S = \frac{629.23 - 634.4}{2 - 0} = -2.585 \text{ nm/GPa} \quad (12)$$

با توجه به نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که حسگر بلور فوتونی پیشنهادی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متاثر از تغییرات ضریب شکست و نیز شکل هندسی ساختار است و لذا عدم لحاظ نمودن تاثیر هر کدام منجر به ایجاد خطای زیادی در نتایج خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی یک حسگر فشار بلور فوتونی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی، اعمال فاکتور تغییر ابعاد هندسی ساختار در کنار فاکتور تغییر ضریب شکست، از وجوه متمایز تحقیق مورد نظر است. حسگر مورد نظر مبتنی بر یک تیغه بلور فوتونی دو بعدی از ماده PbMoO_4 است. تاثیرات اعمال فشاری عمود بر راستای تابش نور عبوری از حسگر، اعم از تغییر شکل هندسی و تغییر ضریب شکست، چگونگی محاسبه این تغییرات با استفاده از نرم افزار و روابط مورد نیاز تشریح شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار حسگر پیشنهادی، نسبت به هر دو فاکتور تغییر ضریب شکست و تغییر شکل هندسی از حساسیت قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار است. نشان داده شد که از میان دو فاکتور مورد بررسی، تغییر ضریب شکست از تاثیر بیشتری بر عملکرد حسگر برخوردار است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی اعمال فشار، منجر به جابه‌جایی طول موج تشدید به سمت مقادیر کوتاه‌تر می‌شود. مقدار حساسیت و ضریب کیفیت قله تشدید طیف عبوری در حسگر پیشنهادی به ترتیب عبارت است از -2.585 nm/GPa و 1040 که افزاره فوق را مناسب برای اندازه‌گیری فشار می‌سازد.

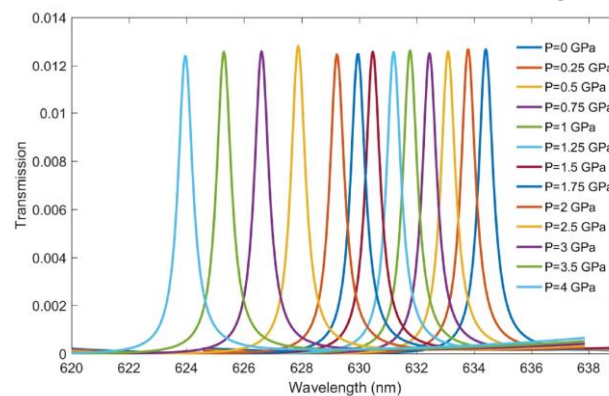


شکل (۹): رابطه بین فشار و جابه‌جایی طول موج تشدید ناشی از تغییر ضریب شکست ساختار

حساسیت ساختار نسبت به تغییر ضریب شکست برابر است با:

$$S = \frac{630.8 - 634.4}{2 - 0} = -1.8 \text{ nm/GPa} \quad (11)$$

نتایج به‌دست آمده نشان دهنده آن است که تغییر ضریب شکست بیشتر از تغییر شکل هندسی، طیف عبوری از ساختار را تحت تاثیر قرار می‌دهد؛ و به عبارت دیگر به ازای اعمال فشاری معین، ساختار نسبت به تغییر ضریب شکست حساسیت بیشتری از خود نشان می‌دهد. شکل (۱۰) تاثیر همزمان تغییر ضریب شکست و تغییر شکل هندسی ساختار به ازای اعمال مقادیر مختلف فشار را بر طیف عبوری نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): جابه‌جایی طول موج تشدید در اثر اعمال فشار با در نظر گرفتن فاکتورهای تغییر ضریب شکست و تغییر شکل هندسی

منحنی نهایی تغییرات بین طول موج تشدید و فشار اعمالی در حسگر پیشنهادی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش فشار طول موج تشدید به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

مراجع

- [17] S. Oyaee, and A.A Dehghani, "High Resolution and Wide Range Pressure Sensor Based on Two-Dimensional Photonic Crystal", *Photonic Sensors*, 2(1), 92-96, 2012.
- [18] B.T. Tung, D.V. Dao, S. Susumu, H.M. Nguyen, S. Rogge and H.W.M. Salemink, "Strain Sensitivity of a Modified Single-Defect Photonic Crystal Nanocavity for Mechanical Sensing", *IEEE sensors conference*, 2010.
- [19] M. J. Weber, *Handbook of Optical Materials*, (CRC Press LLC, Boca Raton, 2003).
- [20] D. Biallo, A. D'Orazio, M.D. Sario, V. Marrocco, V. Petruzzelli, M. Vincenti, F. Prudenzano, T. Stomeo, M. Grande, G. Visimberga, R. Cingolani, and M.D. Vittorio, "Design of a Photonic Crystal Microcavity Pressure Sensor", *EOS Topical Meeting on Nanophotonics, Metamaterials and Optical Micro cavities TOM 3*, 187-188, 2006.
- [1] T.F. Krauss, "Slow light in photonic crystal waveguides", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40(9), 2666-2670, 2007.
- [۲] تهمینه جلالی، احمد محمدی، "مقایسه نتایج شبیه‌سازی بلور فوتونی با استفاده از روش FDTD دوبعدی بهبودیافته و FDTD سه‌بعدی"، *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۰، شماره ۱، (۱۳۹۲).
- [۳] تهمینه جلالی، "بررسی موجبر جداکننده توان بهینه بلور فوتونیک"، *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۳، شماره ۴، (۱۰-۱۳۹۵).
- [۴] سعید علیایی، احمد محب زاده بهابادی، "طراحی حسگر زیستی کریستال فوتونی مبتنی بر نانوتشدیدگر"، *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۳، شماره ۴، (۱۰-۱۳۹۵).
- [۵] کیازند فصیحی، "طراحی و شبیه‌سازی حسگر گاز نوین حساسیت بالا مبتنی بر بلور فوتونی با ضریب شکست منفی"، *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۶، شماره ۲، (۴-۱۳۹۸).
- [6] N. Skivesen, A. Têtu, M. Kristensen, J. Kjems, L.H. Frandsen, and P.I. Borel, "Photonic crystal waveguide biosensor", *Opt. Express.*, 15(6), 3169-3176, 2007.
- [7] W. Zhang, N. Ganesh, I.D. Block, and B.T. Cunningham, "High sensitivity photonic crystal biosensor incorporating nanorod structures for enhanced surface area", *Sens. Actuators. B. Chem.*, 131(1), 279-284, 2008.
- [8] Y.J. Lee, S.A. Pruzinsky, and P.V. Braun, "Glucose-sensitive inverse opal hydrogels: analysis of optical diffraction response", *Langmuir* 20(8), 3096-3106, 2004.
- [9] T. Süner, T. Stichel, S. Kwon, T.W. Schlereth, S. Hofling, M. Kamp, and A. Forchel, "Photonic crystal cavity based gas sensor", *Appl. Phys. Lett.*, 92(26), 261112, 2008.
- [10] M. Huang, "Stress effects on the performance of optical waveguides", *Int. J. Solids Struct.*, 40, 1615-1632, 2003.
- [11] Y. Lu and A. Lal, "Photonic crystal based all-optical pressure sensor," in *IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Cancun, January 24-27, 621-624, 2011.
- [12] M. Hou, Y. Wang, S. Liu, J. Guo, Z. Li, and P. Lu, "Sensitivity-enhanced pressure sensor with hollow-core photonic crystal fiber," *J. Lightw. Technol.*, 32(23), 4637-4641, 2014.
- [13] J. Sabarinathan, A. Bakhtazad, B.Poulsen, M. Zylstra, "Photonic crystal thin-film micro-pressure sensors", *International Conference on Optical & Optoelectronic properties of Materials & Applications (ICOOPMA)*, Leeds, UK, 2014; *Journal of Physics: Conference Series*.
- [14] K. Radanovich, Z. Jaksic, and Z. Djuric, "Design and simulation of stressed 2D photonic crystals by finite element method", *II International Symposium Light Metals and Composite Materials*, 2004.
- [15] D. Biallo, M.D. Sario, A. D'Orazio, V. Marrocco, V. Petruzzelli, M.A. Vincenti, F. Prudenzano, T. Stomeo, M. Grande, G. Visimberga, R. Cingolani, and M.D. Vittorio, "High sensitivity photonic crystal pressure sensor", *J. Eur. Opt. Soc.*, 2, 07017, 2007.
- [16] B.T. Tung, D.V. Dao, T. Ikeda, Y. Kanamori, K. Hane, and S. Sugiyama, "Investigation of strain sensing effect in modified single-defect photonic crystal nanocavity", *Opt. Express.*, 19(9), 8821-8829, 2011.

زیر نویس‌ها

- ¹sensor
²finite element method
³finite-different time-domain
⁴sensitivity
⁵quality factor
⁶band gap
⁷defect
⁸strain
⁹Young's modulus
¹⁰Poisson's ratio
¹¹stress
¹²shear modulus