

طراحی و شبیه‌سازی حسگر دمای بلور فوتونی حساسیت بالا مبتنی بر کاواک پر شده با آب مقطر

راضیه یوسفی هاشم آباد^۱ کیازند فصیحی^۲

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

ryosefi179@gmail.com

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

k.fasihi@gu.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی دو بعدی یک حسگر دمای بلور فوتونی حساسیت بالا ارائه شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش تفاضل- محدود حوزه- زمان (FDTD)، توسط نرم‌افزار آرسافت و به صورت دو بعدی انجام شده است. ساختار پیشنهادی از یک کاواک پر شده با آب مقطر که در مرکز یک موج‌بر نوری قرار گرفته، تشکیل شده است. ویژگی‌های عملکردی حسگر پیشنهادی با در نظر گرفتن فاکتورهای تغییرات دمایی ضریب شکست سیلیسیوم (ماده زمینه) و آب مقطر (ماده پر کننده کاواک) و نیز تغییرات دمایی ابعاد ساختار حسگر، مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که شعاع کاواک و شعاع حفره‌هایی که از طرفین آن را احاطه کرده‌اند، نقش مهمی در عملکرد حسگر پیشنهادی دارند. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، مقدار طول موج تشدید کاواک طراحی شده به‌طور خطی با دما تغییر می‌کند. در ساختار حسگر بهینه شده مقدار حساسیت، مقدار متوسط ضریب کیفیت و عبوردهی به ترتیب عبارتند از: $149/79 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ، 6105 و $0/6$ ، که حسگر فوق را مناسب برای کاربردهای اندازه‌گیری نوری دما می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: حسگر دما، بلور فوتونی، تفاضل- محدود حوزه- زمان، ضریب انبساط حرارتی، ضریب شکست، حساسیت، ضریب کیفیت

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۹/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱/۲۵

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

گذردهی نسبی (۱۱/۴) بوده و شعاع میله‌ها برابر با $0/3a$ است که در آن a ثابت شبکه بلور فوتونی بوده و برابر 640nm در نظر گرفته شده است. در این پژوهش با در نظر گرفتن فاکتور تغییرات دمایی ضریب شکست و نیز اعمال ضریب انبساط حرارتی برای ماده سیلیسیوم، به حسگری با حساسیت $6/6\text{ pm}/^\circ\text{C}$ در بازه دمایی 0°C تا 100°C دست یافته‌اند. با این وجود، مقدار حساسیت حسگر فوق ناچیز بوده و برای اندازه‌گیری‌های دقیق، چندان مناسب نیست. در سال ۲۰۱۶ هوسینی و همکاران [۲۰]، یک حسگر دمای مبتنی بر ساختار بلور فوتونی حفره‌ای دو بعدی را مورد بررسی قرار دادند. این ساختار با استفاده از دو موج‌بر و یک میکرو-کاواک و در یک شبکه مثلثی بلور فوتونی حفره‌ای پیاده‌سازی شده است. موج‌برها با پر کردن یک ردیف از حفره‌ها و کاواک با پر کردن یک حفره در مرکز ساختار ساخته شده است. کاواک به وسیله سه حفره در طرفین خود از ورودی و خروجی موج‌بر جدا شده است. حفره‌های احاطه کننده با آب مقطر پر شده‌اند. حساسیت این حسگر برابر $84\text{ pm}/^\circ\text{C}$ محاسبه شده است. طول موج تشدید این حسگر تقریباً به‌طور خطی با دما تغییر می‌کند و گستره دمایی قابل اندازه‌گیری برای آن از 293^{K} تا 343^{K} است. در این پژوهش، علی‌رغم گزارش ضریب حساسیت مناسب، اما تنها فاکتور تغییرات دمایی ضرایب شکست ساختار در نظر گرفته شده است. بر این اساس فقدان پژوهش‌های دقیق، و طراحی-های با حساسیت بالا در زمینه طراحی حسگرهای دمای بلور فوتونی کاملاً مشهود است. از این رو، در شبیه‌سازی انجام شده، فاکتور ضریب انبساط حرارتی (که خود ضریبی وابسته به دما است) نیز در شبیه سازی عددی لحاظ شده است، تا با در نظر گرفتن بیشتر عوامل دخیل، واقعی‌ترین نتایج ممکن به دست آید.

در این مقاله، حسگری جدید با مقدار حساسیت بالا (در حدود دو برابر مقدار ارائه شده در تحقیقات پیشین) برای اندازه‌گیری دما پیشنهاد شده است. در ساختار مورد نظر، تغییرات دمایی ضریب شکست ماده زمینه بلور فوتونی (سیلیسیوم)، تغییرات دمایی ضریب شکست آب مقطر (ماده پرکننده کاواک) و نیز ضریب انبساط حرارتی ماده زمینه، در شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شده است. آب مقطر یکی از مواد متداول در طراحی و تست عملکرد حسگرهای مبتنی بر بلورهای فوتونی حفره‌ای (و نیز فیبری) و به خصوص با کاربردهای حوزه زیستی (به دلیل نزدیکی ضرایب شکست آنالیت‌های حوزه زیستی با ضریب شکست آب مقطر) است. تزریق آب مقطر به داخل ساختارهای مبتنی بر بلورهای فوتونی حفره‌ای و یا بلورهای فوتونی فیبری، در تحقیقات زیادی انجام شده است.

۲- اساس عملکرد حسگرهای دمایی بلور فوتونی

با ایجاد سامانه‌هایی مرکب از موج‌برها و کاواک‌های مبتنی بر بلورهای فوتونی، می‌توان حسگرهایی با ویژگی‌های عملکردی مطلوب طراحی

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؛ وجود این تغییرات تناوبی در ضریب شکست باعث ایجاد شکاف باند فوتونی^۱ (یا باند توقف) در نمودار باند ساختار می‌شود که از ویژگی‌های منحصر به فرد این ساختارهاست. در صورت استفاده از موادی با ضرایب شکست مشخص و نیز تنظیم پارامترهای هندسی، می‌توان ویژگی‌های شکاف باند فوتونی را کنترل نمود. اصلاح شکاف باند فوتونی و ایجاد حالت‌های مجاز، با ایجاد نقص^۲ در ساختار امکان پذیر است، که اساس پیاده‌سازی بسیاری از افزارهای مبتنی بر بلورهای فوتونی است. استفاده از بلورهای فوتونی در طول دهه‌ی گذشته به سرعت در حال گسترش بوده و از ساختارهایی چون موج-برها، فیبرهای نوری، فیلترهای نوری، کوپلرها، تشدیدگرها، مالتی پلکسرها و تاخیر دهنده‌ها گرفته، تا مواردی هم‌چون طراحی گیت‌های منطقی اپتیکی، فلیپ فلاپ‌های نوری، ترانزیستورهای نوری و مدارهای مجتمع نوری را شامل می‌شود [۱-۷]. 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 پیاده سازی حسگرهای بیوشیمیایی و فیزیکی استفاده نمود. در حقیقت بلورهای فوتونی، ساختارهای نوری جذابی برای کنترل و دست‌کاری نور هستند. به تازگی فن‌آوری حسگری مبتنی بر بلورهای فوتونی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. حسگرهایی که بر اساس بلورهای فوتونی پیاده‌سازی شده‌اند قادر به دستیابی حساسیت‌هایی بالا، برای کاربردهای حسگری هستند [۸-۱۶]. تاکنون طراحی‌های اندکی برای حسگرهای دمای مبتنی بر بلورهای فوتونی ارائه شده است. ادوات حسگری پیشنهاد شده بسته به جنس مواد مورد استفاده و نیز ساختارهای به‌کار گرفته شده، دارای گستره حسگری متفاوت بوده و در نتیجه کاربردهای متفاوتی نیز دارند. در سال ۲۰۱۱ کاین و همکاران [۱۷]، با ساختاری تشکیل شده از یک معکوس کننده حلقه ای و یک فیبر بلور فوتونی دو شکستی پر شده با الکل، حسگری دمایی با حساسیت بسیار بالا $6/6\text{ nm}/^\circ\text{C}$ ارائه نمودند. همچنین در سال ۲۰۱۹ یانگ و همکاران [۱۸]، حسگر دمایی مبتنی بر فیبر بلور فوتونی پر شده با آنالیت و نانوسیم‌های نقره با حساسیت $2/7\text{ nm}/^\circ\text{C}$ معرفی نمودند. هر دو طرح فیبری-بلور فوتونی ارائه شده با وجود برخورداری از حساسیت بسیار مناسب، دارای گستره کاری محدودی بوده و نیز ضریب کیفیت قله‌های تشدید طیف عبوری در آنها بسیار کم است. در سال ۲۰۱۱ های-وی و همکاران [۱۹]، یک ساختار حسگر دمایی مبتنی بر تعبیه چندین میکرو-کاواک در داخل یک موج‌بر بلور فوتونی دو بعدی، پیشنهاد دادند. ساختار بلور فوتونی به‌کار گرفته شده در این حسگر به صورت میله‌ای (در ماده زمینه هوا) و با شبکه مربعی است. جنس ماده میله‌ها، سیلیسیوم (با

نمود. مهم‌ترین پارامترهایی که در طراحی حسگرهای بلور فوتونی مورد بررسی قرار می‌گیرند عبارتند از:

(۱) عبوردهی.

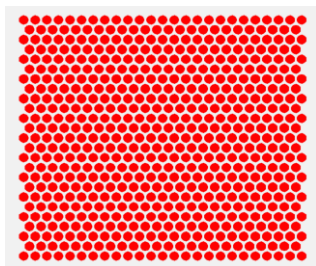
(۲) حساسیت: این کمیت به صورت $\Delta\lambda_{res}/\Delta T$ ($pm/^\circ C$) تعریف می‌شود.

(۳) ضریب کیفیت (Q): این کمیت به صورت $Q = f_{res} FWHM^{-1}$ تعریف می‌شود ($FWHM$ معرف عرض پیک در نصف عبوردهی بیشینه است).

D_1 و D_2 به ترتیب ناحیه فضایی دارای اغتشاش (حای ماده حساس به دما) و کل فضای ساختار حسگر را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بر اساس تئوری اغتشاش الکترومغناطیسی مرتبه اول، در نتیجه تغییرات دمایی ضریب شکست ماده زمینه و کاواک، مقدار طول موج تشدید کاواک تعبیه شده در ساختار حسگر، دارای تغییراتی خطی خواهد بود که نسبت این دو مقدار، معرف مقدار حساسیت حسگر است. از طرف دیگر تغییر دما با ایجاد انبساط یا انقباض ساختار (تغییر مقیاس ساختار) موجب تغییر مقیاس مقدار فرکانس تشدید می‌شود که می‌بایست مورد ملاحظه قرار گیرد.

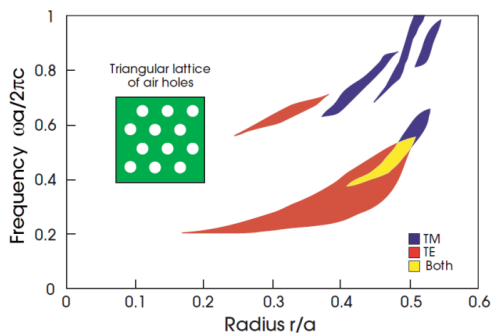
۳- طراحی و شبیه‌سازی حسگر دمای حساسیت بالای پیشنهادی

در طراحی حسگر دمای پیشنهادی از ساختار بلور فوتونی دو بعدی حفره‌ای با شبکه مثلثی (و با فرض $a=1 \mu m$) استفاده شده است (شکل (۱)). در بلور فوتونی به کار گرفته شده که از جنس سیلیسیم است، شعاع حفره‌های ساختار $0.404 \mu m$ انتخاب شده است. بر اساس شکل (۲) می‌توان دید که شعاع حفره‌های بلور فوتونی با شبکه مثلثی طوری انتخاب شده است که ساختار دارای گستره وسیعی از شکاف باند فوتونی باشد [۱].



شکل (۱): ساختار بلور فوتونی دو بعدی حفره‌ای با شعاع حفره‌های

هوایی $0.404 \mu m$ ، ثابت شبکه $1 \mu m$ و ماده زمینه سیلیسیم



شکل (۲): نمودار شکاف باند فوتونی به ازای شعاع‌های مختلف

برای ساختار بلور فوتونی حفره‌ای با شبکه مثلثی به ازای ماده زمینه

سیلیسیم با گذردهی نسبی $\epsilon_r = 11.4$ [۱]

در شکل (۳) شکاف باند فوتونی ساختار برای قطبیدگی TE (با مولفه میدان مغناطیسی عمود بر صفحه) و قطبیدگی TM (با مولفه

بنابراین، به هنگام طراحی یک حسگر دما، هدف اصلی بیشینه نمودن پارامترهای ذکر شده است. از آنجایی که تغییر دما بر روی مقدار ضریب شکست مواد به کار گرفته شده و نیز ابعاد ساختار تاثیر می‌گذارد، بنابراین برای رسیدن به نتایج دقیق، به هنگام طراحی و شبیه‌سازی حسگرهای دمای بلور فوتونی، تاثیر هر دوی این عوامل می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق، با در نظر گرفتن فاکتورهای فوق، دما با گام‌های مناسب تغییر داده شده، و منحنی‌های طیف عبوری از ساختار حسگر محاسبه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. طیف‌های عبوری با استفاده از نرم‌افزار آرسافت^۱ (توسط روش تفاضل-محدود حوزه-زمان^۲ FDTD)، محاسبه می‌شوند. بر اساس تئوری اغتشاش الکترومغناطیسی مرتبه اول می‌توان مقدار جابه‌جایی فرکانس مودهای نقص را برحسب تغییرات کوچک در مقدار ضریب گذردهی مواد نیمه‌هادی به صورت زیر بیان نمود:

$$\Delta\omega = -\frac{\omega}{2} \frac{\int d^3r \Delta\epsilon |E(r)|^2}{\int d^3r \epsilon |E(r)|^2} + O(\Delta\epsilon^2) \quad (1)$$

که در آن ω و E به ترتیب معرف فرکانس کار و پروفایل مود در ماده خطی و بدون اتلاف با تابع گذردهی ϵ است. در رابطه (۱)، از جمله معرف خطا در بسیاری از موارد عملی می‌توان صرف‌نظر نمود [۱]. با در نظر گرفتن تعریف زیر برای ضریب پرشدگی انرژی موجود در ناحیه دارای اغتشاش

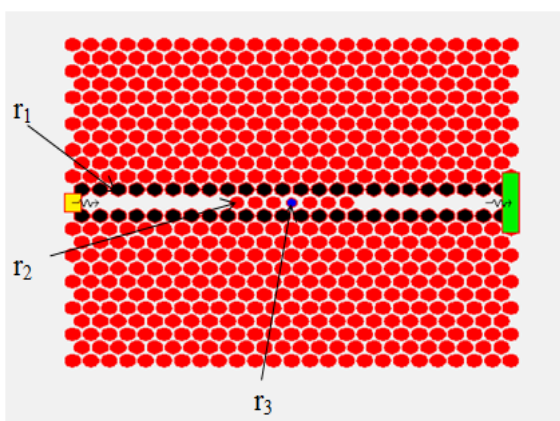
$$f = \frac{\int_{D_1} d^3r \epsilon |E(r)|^2}{\int_{D_2} d^3r \epsilon |E(r)|^2} \quad (2)$$

می‌توان جابه‌جایی فرکانس، ناشی از اغتشاش در مقدار ضریب شکست ناحیه ماده مورد سنجش را با رابطه زیر تعریف نمود [۱۶،۹،۱]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -f \cdot \frac{\Delta\epsilon}{2\epsilon} \quad (3)$$

علامت منفی در عبارت بالا معرف آن است که هر افزایشی در مقدار ضریب شکست، باعث کاهش فرکانس مود نظیر می‌شود. در رابطه (۲)،

بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی، به منظور رسیدن به نتایج بهینه عملکردی، شعاع حفره‌های نشان داده شده با رنگ سیاه، برابر با $r_1 = 0.425 \mu m$ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که کاواک مرکزی این حسگر با آب مقطر پر شده، علاوه بر اعمال تغییرات دمایی ضریب شکست سیلیسیوم و نیز اعمال تغییرات دمایی ابعاد ساختار، تاثیر تغییرات دمایی ضریب شکست آب مقطر نیز حین شبیه‌سازی عددی اعمال می‌شود. بر اساس تئوری اغتشاش الکترومغناطیسی می‌توان پیش‌بینی کرد که چون با تغییر دما، جهت‌های تغییر دمایی ضرایب شکست سیلیسیوم و آب مقطر (با افزایش دما، ضریب شکست سیلیسیوم افزایشی و آب مقطر کاهش‌ی است) مخالف هم هستند، وابستگی طول موجی قله تشدید در طیف خروجی حسگر زیاده‌تر شده و حساسیت حسگر بهبود خواهد یافت. در ضمن همان‌طور که گفته شد ضریب شکست آب مقطر از 1.333 (293^k) تا 1.323 (363^k) دارای تغییرات دمایی خطی است، در نتیجه حسگر پیشنهادی برای اندازه‌گیری مقدار دما در گستره تغییرات 293^k تا 363^k قابل استفاده خواهد بود.

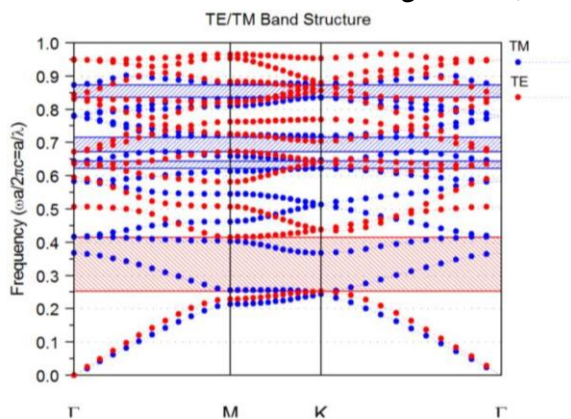


شکل (۴): ساختار حسگر دمای پیشنهادی با کاواک مرکزی پر شده با آب مقطر

۴- تحلیل عملکرد حسگر با تغییر ابعاد فیزیکی ساختار

به‌منظور استخراج مشخصات عملکردی حسگر دمای پیشنهادی، شبیه‌سازی عددی به ازای شعاع‌های مختلف کاواک و حفره‌های محدود کننده آن انجام و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۵) منحنی‌های طیف عبوری را به ازای شعاع‌های مختلف کاواک، r_1 ، در دو دمای 293^k و 363^k نشان می‌دهد. در جدول (۲) ویژگی‌های عملکردی حسگر به ازای تغییرات شعاع کاواک (در گستره $0.28 \mu m$ - $0.3 \mu m$) نشان داده شده است.

میدان الکتریکی عمود بر صفحه، که با استفاده از نرم افزار آرسافت محاسبه شده، نشان داده شده است.



شکل (۳): نمودار باند فوتونی بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مثلثی به ازای قطبیدگی‌های TE و TM

بر این اساس، گستره طول موجی شکاف باند برای قطبیدگی TE از 240 nm تا 3960 nm است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد تغییر دما باعث تغییر در ضرایب شکست مواد تشکیل‌دهنده و هم‌چنین تغییر در ابعاد ساختار بلور فوتونی حسگر می‌شود. در ادامه وابستگی دمایی ضریب شکست سیلیسیوم و نیز وابستگی دمایی ضریب انبساط آن ارائه می‌شود. نشان داده شده است که وابستگی حرارتی ضریب شکست سیلیسیوم از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۲۰]:

$$n = 3.38 (1 + 3.9 \times 10^{-5} \times T); \quad 77 < T^k < 400 \quad (4)$$

باید دانست که ضریب انبساط حرارتی سیلیسیوم در دماهای مختلف یک مقدار ثابت نیست بلکه خود این ضریب تابعی از دماست [۲۱]. در جدول (۱) وابستگی حرارتی ضریب انبساط حرارتی سیلیسیوم نشان داده شده است. ضریب شکست آب مقطر دارای تغییراتی خطی از مقدار 1.333 در دمای 293^k تا مقدار 1.323 در دمای 363^k است [۲۲، ۲۳]، از این رو مقدار آن در دمای دلخواه با درون‌یابی خطی قابل حصول خواهد بود. حال به معرفی ویژگی‌های ساختاری حسگر دمای پیشنهادی (نشان داده شده در شکل (۴)) می‌پردازیم. کاواک مرکزی دارای شعاعی برابر با r_1 بوده و از طرف چپ و راست توسط سه حفره هوایی با شعاع‌های r_2 احاطه شده است. حفره مربوط به کاواک مرکزی با آب مقطر پر می‌شود.

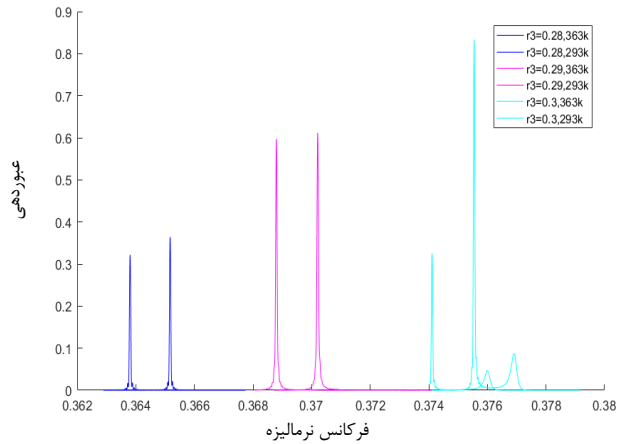
جدول (۱): مقادیر ضریب انبساط حرارتی سیلیسیوم در دماهای مختلف [۲۱]

دما (kelvin)	ضریب انبساط حرارتی $\alpha \times 10^{-6}$
۱۰۰	-۰/۴
۲۰۰	۱/۵
۲۹۳	۲/۶
۴۰۰	۳/۲
۵۰۰	۳/۵
۶۰۰	۳/۷

حفره‌های احاطه‌کننده کاواک بزرگتر انتخاب شوند، میزان عبوردهی کاهش یافته، ولی مقدار ضریب کیفیت افزایش می‌یابد. بر این اساس شعاع $I_2=0/36 \mu m$ به عنوان شعاع بهینه در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۳): پارامترهای حسگر دمای پیشنهادی به ازای شعاع‌های مختلف حفره‌های احاطه‌کننده کاواک (با فرض $I_3=0/29$)

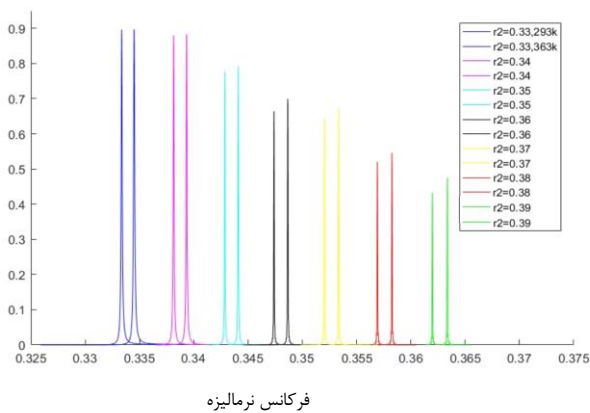
شعاع (μm)	ضریب کیفیت Q	عبوردهی	حساسیت ($pm/^\circ c$)	فرکانس مرکزی ($2\pi c/a$)	دما (Kelvin)
$I_2=0/32$	۲۴۸۰	۰/۹۰۳۱۶	۱۴۳/۵۵	۰/۳۲۹۸۹	۲۹۳
	۲۴۷۲	۰/۹۰۰۲۴		۰/۳۲۸۸	۳۶۳
$I_2=0/33$	۲۶۷۶	۰/۸۹۹۸	۱۴۷/۳۲	۰/۳۳۴۵۱	۲۹۳
	۲۶۶۶	۰/۸۹۳۰		۰/۳۳۳۳۶	۳۶۳
$I_2=0/34$	۳۶۱۰	۰/۸۸۰۴	۱۴۸/۱۵	۰/۳۳۹۳۴	۲۹۳
	۳۵۹۷	۰/۸۷۳۸		۰/۳۳۸۱۵	۳۶۳
$I_2=0/35$	۵۵۵۰	۰/۷۷۸۲	۱۴۸/۹۳۳	۰/۳۴۴۱	۲۹۳
	۵۳۵۰	۰/۷۷۵۸		۰/۳۴۲۸۷	۳۶۳
$I_2=0/36$	۶۱۱۶	۰/۶۹۷۴	۱۴۹/۷۹	۰/۳۴۸۶۶	۲۹۳
	۶۰۹۴	۰/۶۶۵		۰/۳۴۷۳۹	۳۶۳
$I_2=0/37$	۶۱۹۸	۰/۶۶۷۵	۱۴۹/۳	۰/۳۵۳۳۴	۲۹۳
	۶۱۷۶	۰/۶۲۲۴		۰/۳۵۲۰۴	۳۶۳
$I_2=0/38$	۶۸۸۹	۰/۵۴۶۱	۱۴۸/۵۹	۰/۳۵۸۲۵	۲۹۳
	۶۸۶۳	۰/۵۱۵۸		۰/۳۵۶۹۲	۳۶۳



شکل (۵): منحنی‌های طیف عبوری حسگر دما به ازای شعاع‌های مختلف کاواک در دو دمای 293^k و 363^k

جدول (۲): مشخصه‌های حسگر دما به ازای شعاع‌های مختلف کاواک (I_3)

شعاع کاواک (μm)	ضریب کیفیت Q	عبوردهی	حساسیت $pm/^\circ c$	فرکانس تشدید	دما (Kelvin)
۰/۲۸	۶۴۰۶	۰/۳۶۴۴	۱۴۷/۳۲	۰/۳۶۵۱۷	۲۹۳
	۶۹۹۶	۰/۳۲۲۴		۰/۳۶۳۸	۳۶۳
۰/۲۹	۵۹۷۱	۰/۶۱	۱۴۷/۵۳	۰/۳۷۰۲۱	۲۹۳
	۶۴۷۰	۰/۵۹۱۹		۰/۳۶۸۸	۳۶۳
۰/۳	۶۸۲۸	۰/۸۲	۱۴۶/۴۱	۰/۳۷۵۵۵	۲۹۳
	۷۰۵۸	۰/۳۲۱		۰/۳۷۴۱۱	۳۶۳



شکل (۶): منحنی‌های طیف عبوری حسگر دما به ازای شعاع‌های مختلف حفره‌های احاطه‌کننده کاواک، I_2 در دو دمای 293^k و 363^k (با فرض $I_3=0/29$)

با توجه به نتایج شکل (۵) و جدول (۲) می‌توان دید که حسگر دمای مورد نظر به ازای شعاع $I_3=0/29 \mu m$ ضمن اینکه دارای عبوردهی نسبتاً خوبی است (در حدود ۰/۶)، در گستره تغییرات دمایی مورد نظر از تغییر ناچیزی در مقدار عبوردهی نیز برخوردار است. در ضمن قابل ملاحظه است که به ازای هر سه مقدار شعاع مورد بررسی، حسگر از حساسیت و ضریب کیفیت مناسبی برخوردار است. در ادامه، با فرض $I_3=0/29 \mu m$ ، تاثیر مقدار شعاع حفره‌های طرفین کاواک I_2 را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل (۶) منحنی‌های طیف عبوری به ازای مقادیر مختلف I_2 در دو دمای 293^k و 363^k نشان داده شده است. با استفاده از منحنی‌های طیفی شکل (۶)، ویژگی‌های عملکردی حسگر دمای پیشنهادی به ازای تغییرات پارامتر I_2 در گستره $0/32 \mu m - 0/38 \mu m$ ، محاسبه و نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول (۳) دیده می‌شود که هر چه

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دما، مقدار طول موج تشدید به‌طور خطی افزایش می‌یابد. در نتیجه حسگر پیشنهادی با برخورداری از مشخصاتی هم‌چون حساسیت $179/149 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ، عبوردهی $0/6$ ، ضریب کیفیت 6105 (مقدار متوسط ضریب کیفیت در بازه دمایی عملکردی)، که به مراتب بهتر از نتایج تحقیقات ارائه شده پیشین است، می‌تواند به خوبی در کاربردهای دماسنجی نوری به‌کار گرفته شود. به جهت مقایسه، ویژگی‌های حسگرهای دمایی معرفی شده و حسگر پیشنهادی، در جدول ۵ ارائه شده است. در پایان به طور خلاصه، مراحل ساخت و پیاده‌سازی بلورهای فوتونی، که برای پیاده‌سازی حسگر پیشنهادی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

جدول (۵): مقایسه ویژگی‌های عملکردی حسگرهای دمایی مبتنی بر

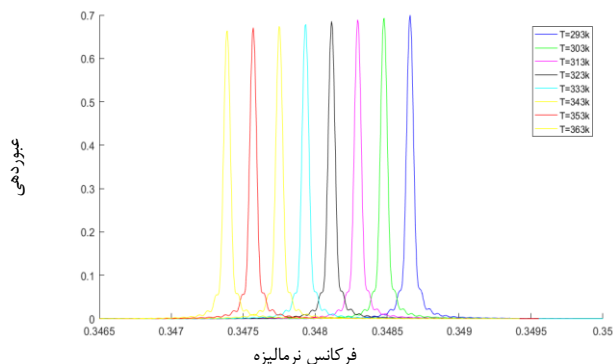
بلورهای فوتونی

مرجع	رهیافت استفاده شده	حساسیت ($\text{nm}/^\circ\text{C}$)	گستره عملکرد ($^\circ\text{C}$)	ضریب کیفیت
[۱۷]	ترکیب یک معکوس کننده حلقه‌ای با فیبر بلور فوتونی دو شکستی بر شده با الکل	۶/۶	۲۸۱ \rightarrow ۳۱۳	۲۹
[۱۸]	فیبر بلور فوتونی پر شده با آنالیت و نانو سیم‌های نقره	-۲/۷	۲۷۳ \rightarrow ۳۱۳	۲۲
[۱۹]	تعبیه چندین کاواک در داخل و کنار یک موج‌بر بلور فوتونی میله‌ای	-۶/۶	۲۷۳ \rightarrow ۳۷۳	-
[۲۰]	تعبیه یک تشدیدگر در یک موج‌بر بلور فوتونی حفره‌ای، استفاده از آب مقطر در حفره‌های محدود کننده کاواک، لحاظ کردن تغییر دمایی ضرایب شکست ساختار	۸۴	۲۹۳ \rightarrow ۳۶۳	۲۳۰
ساختار پیشنهاد شده	تعبیه یک کاواک حفره‌ای پرشونده با آب مقطر در یک موج‌بر بلور فوتونی حفره‌ای، لحاظ کردن تغییر دمایی ضرایب شکست ساختار، لحاظ نمودن ضریب انبساط حرارتی ساختار	۱۴۹/۷۹	۲۹۳ \rightarrow ۳۶۳	۶۱۰۵

دو نوع متداول از بلورهای فوتونی عبارتند از ساختارهای حفره‌ای و نیز ساختارهای میله‌ای. پژوهش‌های زیادی برای توسعه فناوری‌های ساخت بلورهای فوتونی حفره‌ای و نیز میله‌ای در حال انجام است. عمده فناوری‌های ارائه شده مبتنی بر لیتوگرافی باریکه الکترونی و نیز لیتوگرافی چاپ در مقیاس نانو هستند. به عنوان نمونه، مراحل ساخت بلورهای فوتونی حفره‌ای بر روی ویفرهای سیلیکون بر روی عایق^۶ (SOI)، با استفاده از روش لیتوگرافی باریکه الکترونی عبارت است از [۲۴-۲۶]:

- ۱- اکسایش گرمایی به منظور ساخت لایه اکسید (SiO_2). لایه فوق به هنگام انتقال الگوها بر روی Si توسط زدایش یونی واکنش پذیر^۷ (RIE)، نقش ماسک سخت را ایفا می‌نماید.
- ۲- استفاده از لیتوگرافی باریکه الکترونی به منظور انتقال الگوها به ماده مقاوم به پرتو بسیار حساس.
- ۳- زدایش ماسک سخت توسط زدایش یونی واکنش‌پذیر.

شکل (۷) و جدول (۴) به ترتیب منحنی طیف عبوری و مشخصات عملکردی حسگر پیشنهادی را در گستره دمایی 293^k و 363^k با گام-هایی برابر با 10^k نشان می‌دهد. با استفاده از نتایج جدول (۴)، منحنی تغییرات دمایی طول موج تشدید حسگر، مطابق شکل (۸) قابل نمایش است.



شکل (۷): طیف عبوری حسگر دمای پیشنهادی به ازای

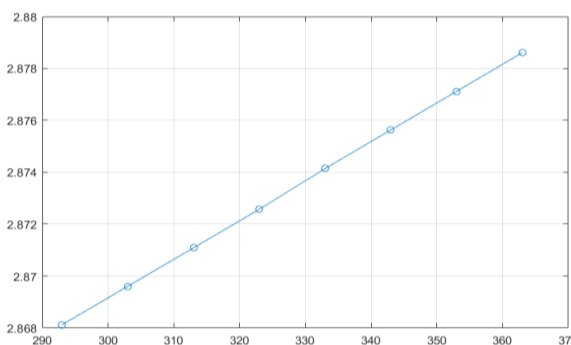
$$293^k - 363^k \text{ در } \Gamma_2 = 0/36 \mu\text{m} \text{ و } \Gamma_3 = 0/29 \mu\text{m}$$

جدول (۴): پارامترهای عملکردی حسگر دمای پیشنهادی به ازای

$$\Gamma_2 = 0/36 \mu\text{m} \text{ و } \Gamma_3 = 0/29 \mu\text{m}$$

دما (Kelvin)	فرکانس مرکزی ($2\pi c/a$)	میانگین عبوردهی	ضریب کیفیت Q
۲۹۳	۰/۳۴۸۶۶	۰/۶۹۰۹	۶۱۱۶
۳۰۳	۰/۳۴۸۴۸	۰/۶۸۸۰	۶۰۰۸
۳۱۳	۰/۳۴۸۳	۰/۶۸۵۶۹	۶۱۱۰
۳۲۳	۰/۳۴۸۱۲	۰/۶۸۲۲	۶۲۱۶
۳۳۳	۰/۳۴۷۹۳	۰/۶۸۷۲	۶۱۱۴
۳۴۳	۰/۳۴۷۷۵	۰/۶۷۰۲۴	۶۱۰۰
۳۵۳	۰/۳۴۷۵۵	۰/۶۶۵۵	۶۲۰۶
۳۶۳	۰/۳۴۷۳۹	۰/۶۶۱۵	۶۲۰۳

طول موج (میکرومتر)



شکل (۸): نمودار طول موج تشدید بر حسب دما به ازای

$$\Gamma_2 = 0/36 \mu\text{m} \text{ و } \Gamma_3 = 0/29 \mu\text{m}$$

lattice photonic crystal slab,” Appl. Phys. Lett., 83, 3870-3872, 2004.

- [6] ته‌مینه جلالی، احمد محمدی، "مقایسه نتایج شبیه‌سازی بلور فوتونی با استفاده از روش FDTD دوبعدی بهبود یافته و FDTD سه‌بعدی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۰، شماره ۱، (۱۳۹۲).
- [7] ته‌مینه جلالی، "بررسی موج‌بر جداکننده توان بهینه بلور فوتونیک"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۴، (۱۳۹۵).
- [8] سعید علیایی، احمد محب زاده بهابادی، "طراحی حسگر زیستی کریستال فوتونی مبتنی بر نانو تشدیدگر"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۴، (۱۳۹۵-۱۰).
- [9] کیازند فصیحی، "طراحی و شبیه‌سازی حسگر گاز نوبین حساسیت بالا مبتنی بر بلور فوتونی با ضریب شکست منفی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۶، شماره ۲، (۱۳۹۸-۴).
- [10] N. Malmir, K. Fasihi, "A highly-sensitive label-free biosensor based on two dimensional photonic crystals with negative refraction," J. Mod. Opt., 64, 2195-2200, 2017.
- [11] N. Skivesen, A. Têtu, M. Kristensen, J. Kjems, L.H. Frandsen, P.I. Borel, "Photonic crystal waveguide biosensor," Opt. Express, 15(6), 3169-3176, 2007.
- [12] W. Zhang, N. Ganesh, I.D. Block, B.T. Cunningham, "High sensitivity photonic crystal biosensor incorporating nanorod structures for enhanced surface area," Sens. Actuators B Chem., 131(1), 279-284, 2008.
- [13] Y.J. Lee, S.A. Pruzinsky, P.V. Braun, "Glucose-sensitive inverse opal hydrogels: analysis of optical diffraction response," Langmuir (ACS Publications), 20(8), 3096-3106, 2004.
- [14] T. Süner, T. Stichel, S. Kwon, T.W. Schlereth, S. Hofling, M. Kamp, A. Forchel, "Photonic crystal cavity based gas sensor," Appl. Phys. Lett., 92(26), 261112, 2008.
- [15] S. Najafgholinezhad and S. Olyaei, "A photonic crystal biosensor with temperature dependency investigation of micro-cavity resonator," Optik, 125(21), 6562-6565, 2014.
- [16] A. Anamoradi, K. Fasihi, "A highly sensitive optofluidic-gas sensor using two dimensional photonic crystals," Superlattices Microstruct., 125, 302-309, 2019.
- [17] W. Qian, C.L. Zhao, S. He, X. Dong, S. Zhang, Z. Zhang, S. Jin, J. Guo, H. Wei, "High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror," Opt. Lett. 36(9), 1548-1550, 2011.
- [18] X. Yang, Y. Lu, L. Duan, H. Hang, J. Yao, "Photonic crystal fiber temperature sensor filled with liquid and silver nanowires," SPIE-Intl. Soc. Optical. Eng., 10872, 2019.
- [19] F. Hai-Wei et al., "Study on a novel photonic crystal temperature sensor," Optoelectron. Lett., 7(6), 419-422, 2011.
- [20] A. Hocini, A. Harhourz, "Modeling and analysis of the temperature sensitivity in two-dimensional photonic crystal microcavity," J. Nanophotonics, 10(1), 016007-016010, 2016.
- [21] J.W. Marvin, J. Weber, Handbook of optical materials, CRC perss LLC, 2003.
- [22] J.B. Hawkes and R.W. Astherimer, "Temperature coefficient of the refractive index of water," J. Opt. Soc. Am., 38(9), 804-806, 1948.

۴- فرآیند زدایش پلاسما تزویجی القایی^۱ (ICP)، که در آن SiO_2 رشد یافته به شیوه گرمایی نقش ماسک سخت را دارد، و ایجاد میله‌های نیمه‌هادی.

لازم به ذکر است که حسگر پیشنهادی به دلیل برخورداری از ساختار حفره‌ای، از دشواری‌های ساخت بسیار کمتری نسبت به ساختارهای میله‌ای برخوردار است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک حسگر دما مبتنی بر بلور فوتونی دو بعدی با شبکه‌ای مثلثی از جنس ماده زمینه سیلیسیوم ارائه شد. ساختار حسگر پیشنهادی شامل یک کاواک مرکزی پر شده با آب مقطر، احاطه شده توسط سه حفره هوایی، در طرفین است. شعاع حفره‌های ردیف بالایی و پایینی موج‌بر مرکزی برابر $r_1 = 0.425 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شد. به هنگام انجام شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر روش FDTD، تغییرات دمایی ضریب شکست سیلیسیوم و آب مقطر و نیز تغییرات دمایی ابعاد ساختار بلور فوتونی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از تکرار شبیه‌سازی برای شعاع‌های مختلف کاواک، به ازای شعاع کاواک $r_3 = 0.29 \mu\text{m}$ ، حسگر دارای عبوردهی مناسب با تغییرات جزئی در گستره دمایی قابل اندازه‌گیری است. به منظور بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی حسگر مورد نظر، تاثیر تغییر شعاع حفره‌های طرفین کاواک مورد بررسی قرار گرفت و مقدار شعاع بهینه $r_2 = 0.36 \mu\text{m}$ انتخاب شد. در حسگر بهینه شده، حساسیت، مقدار متوسط ضریب کیفیت و عبوردهی به ترتیب برابر با $149/79 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ، 61.05 و 0.6 محاسبه شد. این ساختار به دلیل محدود بودن گستره تغییرات خطی دمایی ضریب شکست آب مقطر، دارای گستره اندازه‌گیری دمایی برابر با 293^{K} الی 363^{K} خواهد بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مویده آن است که حسگر دمای طراحی شده دارای مشخصاتی به مراتب بهتر از نتایج ارائه شده در تحقیقات قبلی است.

مراجع

- [1] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, R.D. Meade, Photonic crystals: molding the flow of light, 2nd Edition, Princeton Univ. Press, 2008.
- [2] L.J. Wu, M. Mazilu, J. Gallet, T.F Krauss, A. Jugessur, R.M. De La Rue, "Planar photonic crystal polarization splitter," Opt. Lett., 29(14), 1620-1622, 2004.
- [3] X.Y. Lei, H. Li, F. Ding, W. Zhang, N.B. Ming, "Novel application of a perturbed photonic crystal: high quality filter," Appl. Phys. Lett., 71(20), 2889-2891, 1997.
- [4] T. Lopetegi, M. Laso, M. Erro, D. Benito, M. Garde, F. Falcone, M. Sorolla, "Novel photonic bandgap microstrip structures using network topology," Microw. Opt. Tech. Lett., 25(1), 33-36, 2000.
- [5] S.H. Kwon, H.Y. Ryu, G.H. Kim, Y.H. Lee, S.B. Kim, "Photonic band edge laser in two dimensional square-

- [23] A.N. Bashkatov, E.A. Genina, "Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation," Proc. SPIE, 393–395, 2003.
- [24] C. Kraeh, A. Popsecu, M. Schieber, H. Hedler, T. Bieniek, G. Wielgoszewski, M. Moczala, J. Finley, "Fabrication of high aspect ratio microtube arrays for 2D photonic crystals," Materials Research Express, 1, p. 026201, 2014.
- [25] C.Y. Liu, "Fabrication and optical characteristics of silicon-based two-dimensional photonic crystal Mach-Zehnder interferometers," Physica E, 40, pp. 2800–2804, 2008.
- [26] C.Y. Liu, "Fabrication and optical characteristics of silicon-based two-dimensional wavelength division multiplexing splitter with photonic crystal directional waveguide couplers," Physics Letters A. 375, pp. 2754-2758, 2011.

زیر نویس ها

¹ Band gap

² Defect

³ Full-width at half-maximum

⁴ Rsoft

⁵ Finite-difference time-domain

⁶ Silicon-on-insulator

⁷ Electron beam lithography

⁸ Inductively coupled plasma etching process