

طراحی و شبیه‌سازی حسگر گاز نوین حساسیت بالا مبتنی بر بلور فوتونی با ضریب شکست منفی

کیازند فصیحی

۱- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه گلستان- گرگان- ایران

k.fasihi@gu.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی یک حسگر گاز نوین حساسیت بالا، مبتنی بر ساختاری ترکیبی از بلورهای فوتونی با ضرایب شکست مثبت و منفی ارائه شده است. نشان داده می‌شود که استفاده از بلور فوتونی با ضریب شکست منفی، با متمرکز کردن توان نوری عبوری در قسمت ورودی موج‌بر حاوی مواد مورد سنجش، منجر به افزایش مقدار عبوردهی حسگر می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش FDTD دو بعدی نشان دهنده آن است که حسگر پیشنهادی از حساسیتی برابر با $RIU/876\text{ nm}$ و نیز عبوردهی حدود $0/7\%$ برخوردار است. ساختار اصلاح شده حسگر که حاصل از تعبیه یک کاواک در مرکز کانال حسگری است، حساسیت $RIU/880\text{ nm}$ ، ضریب کیفیتی برابر با ۳۹۲۰ و عبوردهی حدود $0/6\%$ فراهم می‌آورد که حسگر پیشنهادی را مناسب برای سنجش مواد گازی می‌سازد.

کلمات کلیدی: حسگر گاز، بلور فوتونی، ضریب شکست منفی، موج‌بر، کاواک، حساسیت، ضریب کیفیت

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۳/۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر کیازند فصیحی

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

جدول (۱): نتایج تحقیقات انجام شده

نویسندگان	رهیافت	کاربرد	Q	حساسیت (nm/RIU)
Xiao et al. [8]	موج‌برهای بلور فوتونی دارای پاشیدگی	سنجش مایعات	۲۵۰	۴۹۸
Sünner et al. [9]	کاوآک، استفاده از بخش‌های آینه‌ای و پارک شونده	سنجش گازها	318×10^2	۸۰
Feng et al. [10]	کاوآک، استفاده از بخش‌های آینه‌ای و پارک شونده	سنجش گازها	212×10^6	۲۲۰
Bougriou et al. [11]	موج‌بر احاطه شده توسط حفره‌های حلقه‌ای	سنجش مایعات	ناچیز	۶۲۶
Kumar et al. [12]	موج‌بر بلور فوتونی دو تناوبی	سنجش گازها	۲۸۰۰	۶۱۰
	کاوآک ایجاد شده در مرکز موج‌بر، بلور فوتونی با ضریب شکست منفی	سنجش گازها	۳۹۲۰	۸۸۰

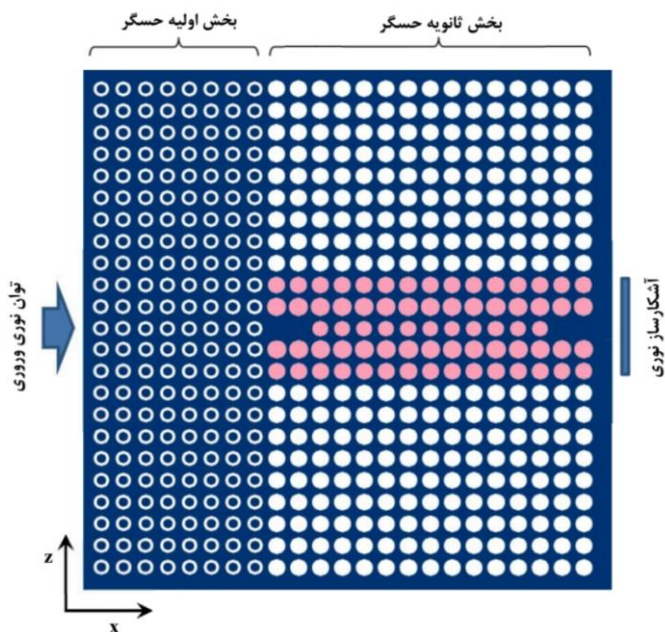
۲- مبانی تئوری برای تحلیل و طراحی حسگر میکرو-جابجایی مبتنی بر بلورهای فوتونی

در شکل ۱ شمای کلی حسگر ضریب شکست پیشنهادی نشان داده شده است. یک حسگر ضریب شکست با عملکردی مناسب، ضمن برخورداری از حساسیت قابل ملاحظه نسبت به تغییر ضریب شکست می‌بایست از عبوردهی و نیز ضریب کیفیت مناسبی نیز برخوردار باشد. ضریب کیفیت معرف میزان تیزی طیف عبوردهی حول فرکانس تشدید (f_{res}) بوده و از رابطه $f_{res} / FWHM$ ، که در آن $FWHM$ پهنای فرکانس در نصف-بیشینه عبوردهی است، محاسبه می‌شود. تحقق اهداف فوق نیازمند ارائه طراحی‌هایی ویژه است. در ادامه مبانی تئوری بکار گرفته شده برای طراحی حسگر پیشنهادی تشریح می‌شود. هرگونه تغییر در ساختار متناوب بلور فوتونی منجر به ایجاد نقص می‌شود. این نقص می‌تواند نقطه‌ای باشد و در نتیجه تغییر مشخصات یک حفره و یا یک میله دی‌الکتریک (از قبیل ابعاد، ضریب شکست و یا حتی موقعیت آن) ایجاد شود، که حاصل آن تحقق یک کاواک است. همچنین می‌توان با تغییر مشخصات ردیفی از حفره‌ها یا میله‌های دی‌الکتریک نقص خطی ایجاد نمود که نتیجه آن ایجاد یک موج‌بر است. با بررسی شکاف باند نوری بلور فوتونی حاصل می‌توان دید که ایجاد نقایص نقطه‌ای و خطی به ترتیب متناظر با ایجاد مود تشدید و نیز مود نقص هدایت شده است. با تغییر ضریب شکست ماده مورد سنجش، واقع در نقایص نقطه‌ای و خطی، به ترتیب مقدار فرکانس تشدید و نیز لبه باند طیف‌های عبور متناظر دچار تغییر می‌شوند. مقدار تغییر طیفی حاصل متناسب با مقدار تغییر در ضریب شکست مواد مورد سنجش است. بر اساس تئوری اغتشاش الکترومغناطیسی مرتبه اول می‌توان مقدار جابجایی فرکانس مودهای نقص را بر حسب تغییرات کوچک در مقدار ضریب گذردهی مواد نیمه‌هادی به صورت زیر بیان نمود [۴]:

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

۱- مقدمه

در دو دهه گذشته افزایش قابل ملاحظه‌ای در پژوهش‌های مرتبط با میکرو-حسگرهای مبتنی بر بلورهای فوتونی ایجاد شده است [۱-۷]. حسگرهای گاز بلور فوتونی با برخورداری از ابعادی در مقیاس میکرو، از حساسیتی قابل ملاحظه نسبت به تغییرات ضریب شکست برخوردارند و یکی از المان‌های اساسی در سامانه‌های تمام نوری به شمار می‌روند. تاکنون پژوهش‌های متعددی برای طراحی و ساخت حسگرهای ضریب شکست، که عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری تغییر فرکانس تشدید طیف عبوری هستند، ارائه شده است [۸-۱۲]. بلورهای فوتونی که ساختارهایی تناوبی از مواد الکترومغناطیسی‌اند، به واسطه برخورداری از شکاف باند نوری، کوچکی ابعاد، هزینه ساخت پایین در هنگام تولید انبوه، امکان مجتمع‌سازی با سایر ادوات و مدارهای مجتمع نوری و نیز گستره فرکانس کاری وسیع از قابلیت زیادی برای پیاده‌سازی حسگرهایی بسیار فشرده برخوردارند [۵،۴]. با انتخاب دقیق پارامترهای ساختاری یک بلور فوتونی، همچون مقدار ثابت شبکه، ابعاد حفره‌های هوایی و نیز نوع ماده زمینه می‌توان ویژگی‌های شکاف باند نوری را کنترل نمود. در سال ۲۰۰۷ ژیاو و همکاران بر پایه موج‌برهای بلور فوتونی دارای پاشیدگی، یک سنسور نور-مایعی با حساسیت 498 nm/RIU ارائه نمودند [۸]. سونر و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک حسگر گاز مبتنی بر کاواک بلور فوتونی با حساسیتی معادل 80 nm/RIU را به طور تجربی پیاده‌سازی کردند [۹]. در سال ۲۰۱۲ فنگ و همکاران با استفاده از کاواک نانو-پرتو یک حسگر تشخیص گاز با حساسیت 230 nm/RIU را طراحی کردند [۱۰]. بوگریو و همکاران در سال ۲۰۱۵ استفاده از موج‌برهای بلور فوتونی مبتنی بر حفره‌های هوایی حلقه‌ای شکل، سنسور نور-مایعی با حساسیت 636 nm/RIU پیشنهاد نمودند [۱۱]. کومار و همکاران در سال ۲۰۱۵ بر پایه موج‌بر بلور فوتونی دوتناوبی، یک حسگر ضریب شکست گاز و مایع را ارائه نمودند که حساسیت آن به ترتیب برای تشخیص گاز و مایع 610 nm/RIU و 300 nm/RIU است [۱۲]. در این مقاله ما حسگر گاز جدیدی که دربردارنده بلورهای فوتونی با ضرایب شکست مثبت و منفی است، ارائه می‌نماییم. حساسیت حسگر پیشنهادی معادل 880 nm/RIU است. این حسگر با دارا بودن ضریب کیفیتی برابر با ۳۹۲۰ از قابلیت مناسبی برای تشخیص گازها برخوردار است. در جدول ۱ به اختصار ویژگی‌های طرح‌های پیشنهادی شده ارائه شده است. در ادامه ابتدا مبانی تئوری برای تحلیل و طراحی حسگر گاز پیشنهادی ارائه شده و سپس ویژگی‌های عملکردی آن با استفاده از روش عددی تفاضل-محدود حوزه-زمان (FDTD)، مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد.



شکل (۱): شمای کلی حسگر ضریب شکست پیشنهادی

۳- طراحی و شبیه‌سازی

همان‌طور که پیش از این اشاره شد حسگر ضریب شکست پیشنهادی از ترکیب دو ساختار بلور فوتونی متفاوت ایجاد شده است. بخش اولیه با ضریب شکست منفی، که نقش افزایش میزان عبوردهی را به عهده دارد و بخش ثانویه با ضریب شکست مثبت، که در بردارنده یک کانال حسگری موج‌بری است. با توجه به شکل ۱، بخش اولیه حسگر از بلور فوتونی با ساختار مربعی، مبتنی بر سیلندرهایی هوایی با مقطع حلقه‌ای در ماده زمینه با ضریب شکست $3/6$ ایجاد شده است. شعاع داخلی و خارجی حلقه‌های هوایی به ترتیب $0.12a$ و $0.136a$ است. دیگرام باند نوری بلور فوتونی در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است. در این مقاله برای انجام کلیه شبیه‌سازی‌های عددی از روش تفاضل-محدود حوزه-زمان (FDTD) استفاده می‌شود. با بررسی منحنی‌های کانتورهای فرکانسی مربوط به مودهای دیگرام باند نوری بلور فوتونی بخش اولیه، و با تشخیص ناحیه ای که در آن اندازه کانتورها با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، می‌توان نتیجه گرفت که بلور فوتونی در باند شماره یک، (TE_1) ، در گستره فرکانسی $(2\pi/a) 0.2351$ تا $(2\pi/a) 0.3209$ ، دارای ضریب شکست منفی است (شکل ۲ (ب)).

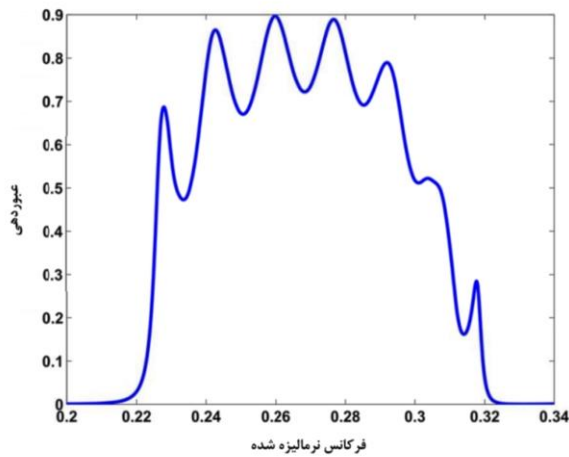
که در آن ω و E به ترتیب معرف فرکانس کار و پروفایل مود در ماده خطی و بدون اتلاف با تابع گذردهی ε است. در رابطه (۱)، از جمله معرف خطا در بسیاری از موارد عملی می‌توان صرف‌نظر نمود [۴]. به این ترتیب با در نظر گرفتن تعریف زیر برای ضریب پرتشنگی انرژی موجود در ناحیه دارای اغتشاش

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

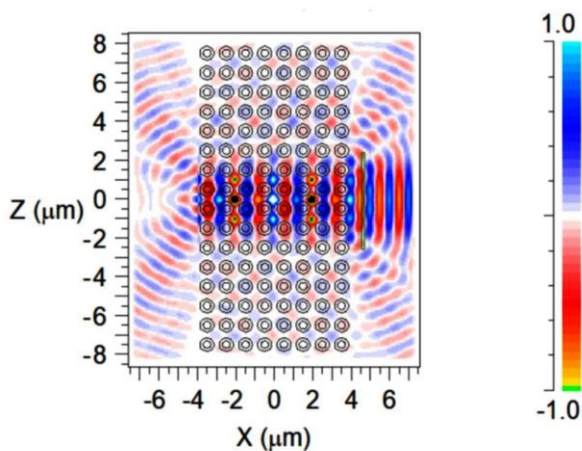
می‌توان جابجایی فرکانس، ناشی از اغتشاش در مقدار ضریب شکست ناحیه ماده مورد سنجش را توسط رابطه زیر بدست آورد [۴]:

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

علامت منفی در عبارت بالا معرف آن است که هر افزایشی در مقدار ضریب شکست باعث کاهش فرکانس مود نظیر می‌شود. در رابطه (۲) D_1 و D_2 به ترتیب ناحیه فضایی دارای اغتشاش (حاوی ماده مورد سنجش) و کل فضای ساختار حسگر را نشان می‌دهد. یکی از مشکلات حسگرهای ضریب شکست مبتنی بر بلورهای فوتونی حفره‌ای، دشواری تزویج امواج نوری با ماده تشکیل دهنده کانال حسگری (که از ضریب شکست پایینی برخوردار می‌باشد) است، زیرا نور همواره تمایل دارد تا انرژی خود را در مواد با ضریب شکست بالاتر توزیع نماید [۵،۴]. برای بهبود مقدار عبوردهی حسگر پیشنهادی، از ساختاری ترکیبی از بلورهای فوتونی استفاده می‌شود. استفاده از ساختار بلور فوتونی با ضریب شکست منفی (که دارای عملکردی همچون لنز است)، در بخش ابتدایی حسگر باعث می‌شود تا امواج عبوری از آن، ابتدا در داخل کانال حسگری متمرکز شده و سپس به سمت آشکار ساز هدایت شوند. در واقع استفاده از خاصیت لنزگونه بخش اولیه، با تمرکز امواج عبوری در داخل کانال، منجر به افزایش تزویج نور با ماده مورد سنجش واقع در کانال حسگری می‌شود. بلورهای فوتونی تحت شرایط ویژه و به ازای گستره فرکانسی خاصی دارای رفتاری همچون محیط‌هایی با ضریب شکست منفی هستند [۱۳،۴]. در مواد دارای ضریب شکست منفی، ضریب گذردهی و نفوذپذیری هر دو منفی هستند. قابل ذکر است که در دهه گذشته استفاده از مواد دارای ضریب شکست منفی مبتنی بر بلورهای فوتونی، به دلیل برخورداری از ویژگی‌های ممتاز، بسیار مورد توجه بوده است [۱۶،۴-۱۹]. دایره‌های صورتی معرف حفره‌هایی هستند که با گاز (و یا سایر مواد مورد سنجش) پر می‌شوند.

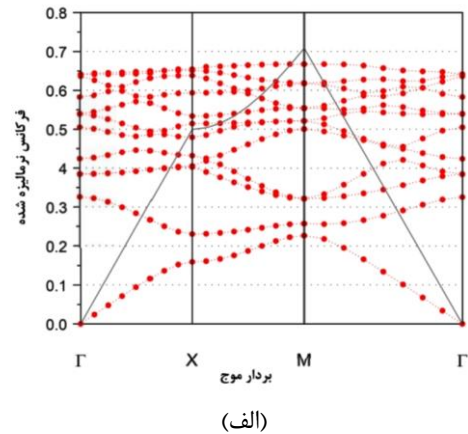


(الف)

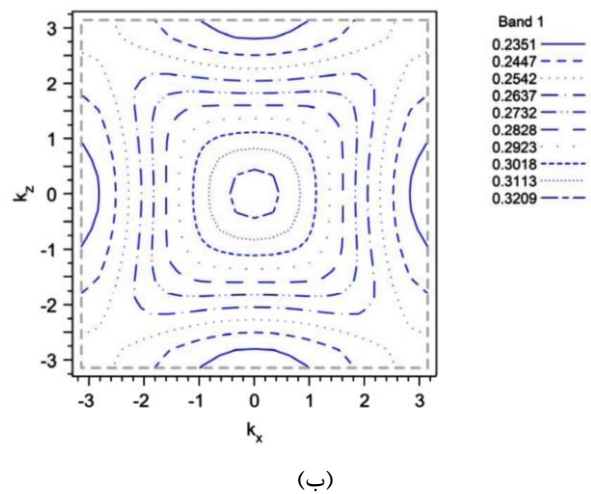


(ب)

شکل (۳): (الف) منحنی طیف عبوری بخش اولیه (ب) دیاگرام توزیع توان الکترومغناطیسی، مربوط به مولفه H_y ، به ازای موجی با فرکانس $0.27437(2\pi/a)$ بخش ثانویه حسگر از بلوری فوتونی با ساختار مربعی، متشکل از حفره‌های هوایی به شعاع $a/4$ در ماده‌ای دی‌الکتریک، یکسان با ماده زمینه بخش اولیه (با ضریب شکست $3/6$)، ایجاد شده است. این ساختار از انتشار امواج نوری با قطبیدگی TE، در گستره فرکانسی $0.251(2\pi/a)$ تا $0.277(2\pi/a)$ جلوگیری می‌کند. منحنی شکاف باند فوتونی این بخش در شکل ۴ نشان داده شده است.



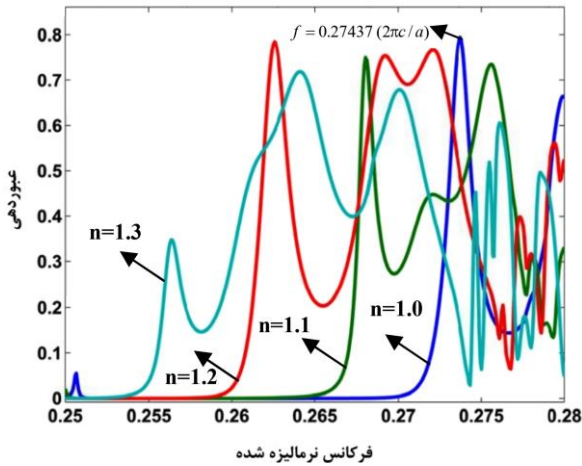
(الف)



(ب)

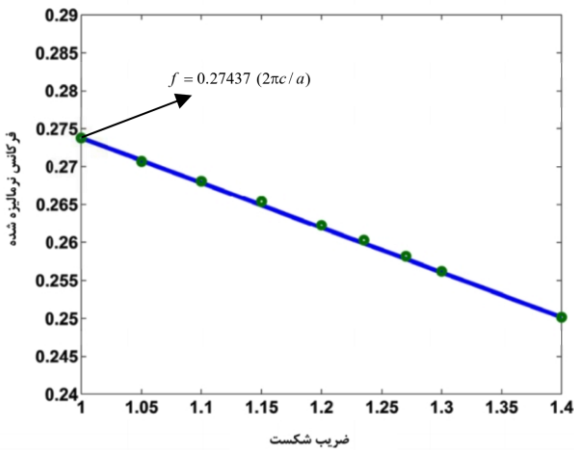
شکل (۲): (الف) دیاگرام باند نوری بلور فوتونی بخش اولیه (ب) کانتورهای فرکانسی مربوط به باند شماره یک (TE_1)

منحنی طیف عبوری و نیز منحنی توزیع توان، مربوط به مولفه H_y به ازای موجی واقع در گستره فرکانسی باند TE_1 (با فرکانس $0.27437(2\pi/a)$)، به ترتیب در شکل ۳ (الف) و (ب) نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۳ (ب) قابل مشاهده است بخش اولیه به ازای فرکانس ذکر شده دارای خاصیت لنز گونه است، به این نحو که توان تشعشعی حاصل از یک منبع خطی (به طول $3a$) در سمت چپ، در ناحیه فضایی محدودی در بخش راست متمرکز شده و مجدداً منتشر می‌شود.



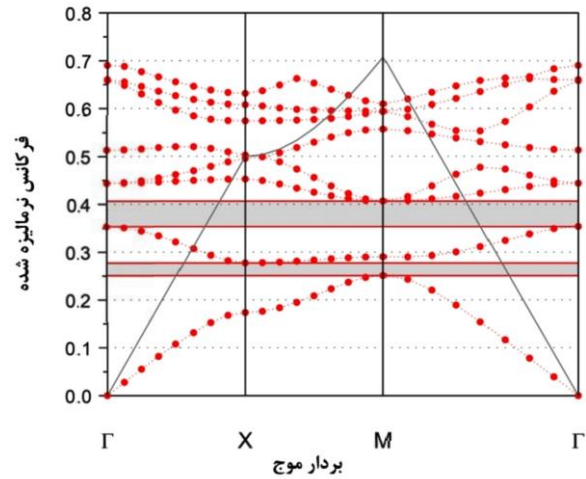
شکل (۶): منحنی‌های طیف عبوری حسگر پیشنهادی به ازای پرشدگی کانال حسگری با مواد دارای ضرایب شکست بین ۱ تا ۱/۳

تغییرات قله تشدید طیف‌های عبوری حسگر به ازای مقادیر مختلف ضرایب شکست مواد مورد سنجش، در شکل ۷ قابل مشاهده است. برای اندازه‌گیری مقدار فرکانس تشدید طیف عبوری حسگر، از دستگاه آنالیزر طیف نوری استفاده می‌شود [۲۰]. همان‌طور ملاحظه می‌شود منحنی حاصل، از تغییراتی خطی برخوردار بوده و لذا حساسیت حسگر پیشنهادی $(S = \frac{\Delta f}{\Delta n})$ ، که در واقع همان شیب منحنی شکل (۷) است، در گستره ضرایب شکست مورد مطالعه، ثابت و برابر 876 nm/RIU است.



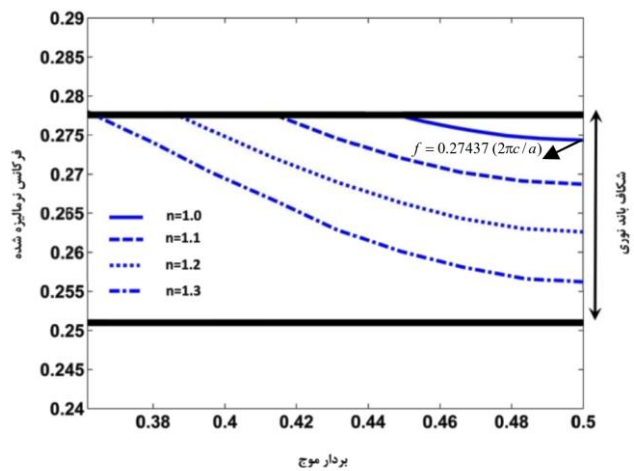
شکل (۷): تغییرات قله تشدید طیف عبوری به ازای ضرایب شکست مختلف

با بررسی قله‌های تشدید در طیف‌های عبوری نشان داده شده در شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که حسگر پیشنهادی با وجود دارا بودن ضریب حساسیتی مناسب و نیز عبوردهی مطلوب، از ضریب کیفیت بالا که از ویژگی‌های ضروری یک حسگر گاز است، برخوردار نیست. از این



شکل (۴): (الف) دیاگرام باند نوری بلور فوتونی بخش ثانویه

حفره‌های تشکیل دهنده ساختار کانال حسگری (که با مواد مورد سنجش پر می‌شوند) با رنگ صورتی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. شعاع حفره‌های ردیف مرکزی برابر $0.37a$ و شعاع حفره‌های دو ردیف احاطه کننده ردیف مرکزی برابر $0.42a$ است. شعاع دو ردیف باقیمانده کانال حسگری $0.4a$ در نظر گرفته شده است. انتخاب مقادیر فوق حاصل از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف برای بهینه‌سازی پارامترهای ساختار و در نهایت رسیدن به عملکردی مطلوب برای حسگر پیشنهادی است. منحنی‌های مود نقص خطی مربوط به کانال حسگری به ازای پرشدگی توسط مواد با ضرایب شکست مختلف در شکل ۵ نشان داده است.

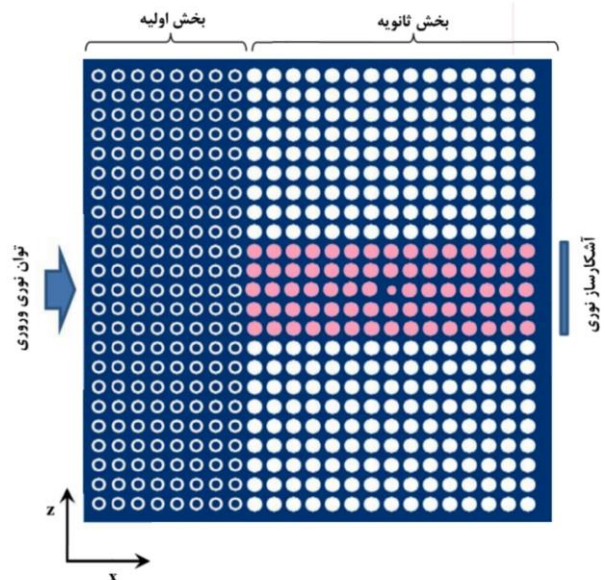


شکل (۵): منحنی‌های مود نقص کانال موج‌بری به ازای پرشدگی کانال حسگری با مواد دارای ضرایب شکست بین ۱ تا ۱/۳

منحنی‌های طیف عبوری حسگر پیشنهادی به ازای پرشدگی کانال با مواد دارای ضریب شکست بین ۱ تا ۱/۳ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود فرکانس نظیر قله‌های طیف عبوری منطبق بر فرکانس لبه پایین مدهای نقص نظیر است.

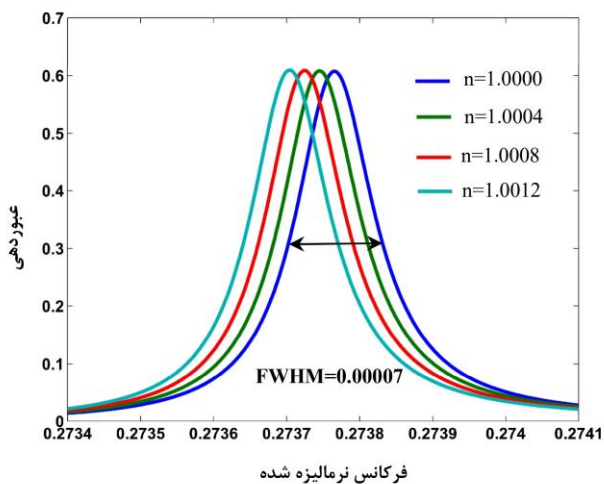
با بررسی طیف‌های عبوردهی در حسگر اصلاح شده می‌توان دید که مقدار ضرایب کیفیت قله‌های تشدید ($f_{res} / FWHM$)، به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. مقدار ضریب کیفیت، به ازای پرتشدگی کانال حسگر با ضرایب کیفیت مناسب موجب ایجاد قله‌های تشدید با ضریب کیفیت مناسب در طیف عبوری حسگر می‌شود. در شکل ۸ ساختار اصلاح شده حسگر نشان داده شده است. در این ساختار نیز دایره‌های صورتی معرف حفره‌هایی هستند که با گازهای مورد سنجش پر می‌شوند.

رو با اصلاح ساختار، ضمن حفظ ضریب حساسیت، مقدار ضریب کیفیت قله‌های تشدید را افزایش می‌دهیم. انجام این کار با تعبیه یک کاواک در وسط کانال حسگری انجام می‌شود. وجود کاواکی با محدودشدگی مناسب موجب ایجاد قله‌های تشدید با ضریب کیفیت مناسب در طیف عبوری حسگر می‌شود. در شکل ۸ ساختار اصلاح شده حسگر نشان داده شده است. در این ساختار نیز دایره‌های صورتی معرف حفره‌هایی هستند که با گازهای مورد سنجش پر می‌شوند.



شکل (۸): ساختار حسگر اصلاح شده با ضریب کیفیت بالا در قله‌های تشدید طیف‌های عبوردهی

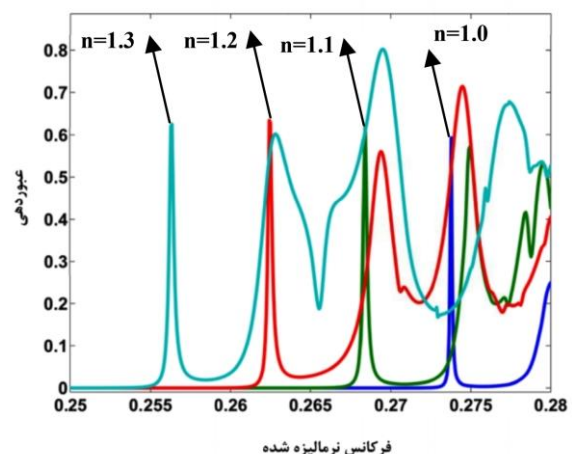
در این ساختار مقدار شعاع کاواک ایجاد شده برابر $0.37a$ و شعاع سایر حفره‌های کانال حسگری برابر $0.14a$ در نظر گرفته شده است. طیف‌های عبوردهی ساختار اصلاح شده به ازای ضرایب شکست مختلف در شکل ۹ قابل مشاهده است.



شکل (۱۰): منحنی‌های طیف‌های عبوردهی در ساختار حسگر اصلاح شده به ازای پرتشدگی کانال حسگری با مواد گازی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی یک حسگر گاز جدید مبتنی بر بلورهای فوتونی با ضرایب شکست مثبت و منفی، ارائه گردید. بخش اولیه حسگر پیشنهادی از بلور فوتونی با ضریب شکست منفی و بخش ثانویه آن از بلور فوتونی با ضریب شکست مثبت تشکیل شده است. استفاده از بلور فوتونی با ضریب شکست منفی باعث تمرکز تابشی در کانال موج‌بری، و در نتیجه موجب بهبود ویژگی‌های عملکردی حسگر می‌شود. نشان داده شد که ایجاد یک کاواک در میان کانال



شکل (۹): منحنی‌های طیف‌های عبوردهی در ساختار حسگر اصلاح شده به ازای پرتشدگی کانال حسگری با مواد دارای ضرایب شکست بین ۱ تا $1/3$

[15] Derbali, J., Abdelmalek, F., Obayya, S.S.B., Bouchriha, H., Letizia, R., "Design of a compact photonic crystal sensor," *Opt. Quant. Electron.*, 42, p. 463–472, 2011.

[16] Ouerghi, F., Abdelmalek, F., Haxha, S., Abid, R., Mejatty, H., Dayoub, I., "Nanophotonic sensor based on photonic crystal structure using negative refraction for effective light coupling," *IEEE J. Lightwave. Technol.*, 27, p. 3269–3274, 2009.

[17] Derbali, L., Abdelmalek, F., Bouchriha, H., "A novel design of a photonic crystal sensor with improved sensitivity," *Optik*, 124, p. 3936–3939, 2013.

[18] Belhadj, W., Gamra, D., Abdelmalek, F., Bouchriha, H., "Design of photonic crystal superlens with improved image resolution," *Opt. Quant. Electron.*, 37, p. 575–586, 2005.

[19] Abdelmalek, F., "Design of a novel left-handed photonic crystal sensor operating in aqueous environment," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 23, p. 188–190, 2011.

[20] Topolancik, J., Bhattacharya, P., Sabarinathan, J., Yu, P.C., "Fluid Detection with Photonic Crystal-Based Multichannel Waveguides." *App. Phys. Lett.*, p. 1143, 82, 2003.

حسگری موجب افزایش ضریب کیفیت قله‌های تشدید در طیف عبوری حسگر می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، مقدار حساسیت، عبوردهی و ضریب کیفیت حسگر پیشنهادی برای اندازه‌گیری ضرایب شکست نزدیک به ۱ (مواد گازی شکل)، به ترتیب برابر با nm/RIU ۸۸۰، ۰/۶ و ۳۹۲۰ می‌باشد. ویژگی‌های فوق حسگر پیشنهادی را مناسب برای تشخیص گازها می‌سازد.

مراجع

[۱] 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).

[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، (۱-۱۳۹۲).

[۳] تهمینه جلالی، "بررسی موجبر جداکننده توان بهینه بلور فوتونیک"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۴، (۱۰-۱۳۹۵).

[4] Joannopoulos, J.D., Johnson, S.G., Winn, J.N., Meade, R.D., *Photonic crystals: molding the flow of light*, 2nd Edition (Princeton Univ. Press, 2008).

[5] Malmir, N., Fasihi, K., "A highly-sensitive label-free biosensor based on two dimensional photonic crystals with negative refraction," *J. Mod. Optic*, 64, p. 2195-2200, 2017.

[6] Nair, R.V., Vijaya, R., "Photonic crystal sensors: An overview," *Prog. Quantum. Electron.*, 34, p. 89–134, 2010.

[7] Zhao, Y., Zhang, Y.N., Wang, Q., "Research advances of photonic crystal gas and liquid sensors," *Sensor. Actuat. B-Chem.*, 160, p. 1288–1297, 2011.

[8] Xiao, S.S., Mortensen, N.A., "Proposal of highly sensitive optofluidic sensors based on dispersive photonic crystal waveguides," *J. Opt. A: Pure Appl., Opt.* 9, p. 463–467, 2007.

[9] Sünner, T., Stichel, T., Kwon, S.H., Schlereth, T.W., Höfling, S., Kamp, M., Forchel, A., "Photonic crystal cavity based gas sensor," *Appl. Phys. Lett.*, 92, p. 261112, 2008.

[10] Feng, C., Feng, G.Y., Zhou, G.R., Chen, N.J., Zhou, S.H., "Design of an ultracompact optical gas sensor based on a photonic crystal nanobeam cavity," *Laser Phys. Lett.*, 9, p. 875–878, 2012.

[11] Bougriou, F., Bochemat, T., Bochemat, M., Paire, N., "Optofluidic sensor using two-dimensional photonic crystal waveguides," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 62, p. 11201, 2013.

[12] Kumar, A., Saini, T.S., Sinha, R.K., "Design and analysis of photonic crystal biperiodic waveguide structure based optofluidic-gas sensor," *Optik*, 126, p. 5172–5175, 2015.

[13] Veselago, V.G., "The electrodynamic of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Sov. Phys.*, 10, p. 509–514, 1968.

[14] Aroua, W., Haxha, S., Abdelmalek, F., "Nano-optic label-free biosensors based on photonic crystal platform with negative refraction," *Opt. Commun.*, 285, p. 1970–1975, 2012.