بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بهبود کیفیت عملکرد حسگر فشار مبتنی بر ساختار کریستال نوری

سعید شاکری‌نژاد، مریم پورمحی‌آبادی

دانشکده برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان

ایمیل:s_shakeri_n@eng.uk.ac.ir

چکیده –در سالهای اخیر، کریستال‌های نوری توجه بسیاری از محققان را جهت کاربرد در ادوات مختلفی از جمله حسگرها به خود جلب کرده‌اند. در این مقاله یک حسگر فشار مبتنی بر ساختار کریستال نوری دو بعدی ارائه، تحلیل و بررسی گردیده است. حسگر پیشنهادی از دو موجبر و یک میکروکاواک تزویج شده با موجبرها تشکیل گردیده است، با اعمال فشار، طول موج تشدید شده در میکروکاواک به صورت خطی افزایش یافته و در نتیجه می‌توان میزان تغییرات طول موج را به عنوان تابعی از فشار محاسبه کرد. حساسیت این حسگر ۱۷/۵*nm/GPa* و محدوده دینامیکی آن ۱۰*GPa* می‌باشد که حاکی از بهبود عملکرد آن نسبت به طرح‌های ارائه شده کنونی است.

کلید واژه- حسگر فشار، شکاف باند نوری، کریستال نوری، موجبر، میکروکاواک.

Performance Improvement of Photonic Crystal Pressure Sensor

Saeed Sakerinezhad, Maryam Pourmahyabadi

Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

S_shakeri_n@eng.uk.ac.ir

Abstract- There is a growing interest in the new science of photonic crystal structures which are finding wide use in various areas such as sensors. In this paper, a novel photonic crystal pressure sensor in which two waveguides are coupled to a ring microcavity is presented. Resonant wavelength of the microcavity depends on the effective refractive index. It should be noticed that the resonant wavelength of the sensor is shifted linearly towards the higher wavelengths region by increasing the applied pressure. The achieved results revealed that the proposed structure presents superior performance in terms of sensitivity and dynamic range (17/5nm/GPa and 10GPa) in comparison with the existing schemes.

Keywords: Band gap, Microcavity, Photonic Crystal, Pressure Sensor, Waveguide

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-08-03]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر ساختارهای جدیدی با عنوان کریستال‌های نوری توجه محققان را به خود جلب کرده است. کریستال‌های نوری از لحاظ ساختار، بسته به اینکه در یک، دو یا سه جهت متناوب باشند به ترتیب به سه دسته یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی تقسیم می‌شوند [۱]. این کریستال‌ها در برابر امواج الکترومغناطیسی رفتاری مشابه رفتار نیمه رساناها در برابر الکترون‌ها از خود نشان می‌دهند، بدینگونه که همانند باند ممنوعه انرژی در نیمه رساناها، در ساختارهای کریستال نوری نیز امواج نوری در برخورد با مواد دی‌الکتریک پدیده مشابهی به نام شکاف باند نوری را تجربه می‌کنند [۳-۲]. به این معنا که امواج الکترومغناطیسی در ناحیه شکاف باند نوری اجازه انتشار در کریستال را ندارند. این ساختارها می‌توانند نور را بوسیله کنترل مشخصه‌های انتقال و بازتاب در فرکانس و جهت مشخص هدایت و کنترل نمایند [۵-۴]، این خصوصیات سبب شده است که مطالعه انتشار امواج الکترومغناطیس در کریستال‌های نوری به یک حوزه تحقیقاتی مهم تبدیل گردد. از دیگر ویژگی‌های این ساختارها مقاومت در برابر تداخل الکترومغناطیسی و امکان استفاده از آن‌ها در دماهای بالا و شرایط مکانیکی و شیمیایی نامساعد می‌باشد [۷-۶].

یکی از کاربردهای این ساختارها در زمینه حسگرهای نوری می‌باشد، که تا کنون بر این اساس طرح‌های بسیاری از جمله Park و همکارانش حسگر دما [۸]، علیایی و همکارانش حسگر فشار [۱۰-۹و۵] و Awad و همکارانش حسگر گاز [۱۱]، ارائه گردیده است.

در این مقاله، طرح جدید یک حسگر فشار کریستال نوری، شامل دو موجبر تزویج شده با میکروکاواک، با حساسیت و ضریب کیفیت و رنج دینامیکی بالاتری نسبت به نمونه‌های قبلی ارائه می‌شود. در بخش بعد تحلیل نظری اثر فشار بیان شده است، سپس ساختار حسگر مورد بررسی قرار گرفته و در انتها شبیه‌سازی و نتایج عملکرد آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲- تحلیل نظری اثر فشار

اعمال فشار به یک کریستال می‌تواند باعث تغییر ساختار و ضریب شکست کریستال گردد، این تغییرات می‌توانند باعث شوند که یک ماده همسانگرد به یک ماده غیر همسانگرد تبدیل گردد. برای یک ماده غیرهمسانگرد، رابطه بین ضریب شکست و فشار (γ) به فرم زیر می‌باشد:

$$\Delta\begin{bmatrix}1/n_{xx}^2\\1/n_{yy}^2\\1/n_{zz}^2\\1/n_{yz}^2\\1/n_{xz}^2\\1/n_{xy}^2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}P_{11}&P_{12}&P_{12}&0&0&0\\P_{12}&P_{11}&P_{12}&0&0&0\\P_{12}&P_{12}&P_{12}&0&0&0\\0&0&0&P_{44}&0&0\\0&0&0&0&P_{44}&0\\0&0&0&0&0&P_{44}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\gamma_{xx}\\\gamma_{yy}\\\gamma_{zz}\\\gamma_{yz}\\\gamma_{xz}\\\gamma_{xy}\end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در این رابطه P_{ij}ها ثابت فشار اپتیکی می‌باشند، مهمترین این ثابت‌ها P_{11} و P_{22} می‌باشند. در مرحله بعد می‌بایست، ضرایب شکست جدید تحت فشار اعمال شده را محاسبه کنیم، با استفاده از روابط فشار، رابطه قبل را می‌توان به فرم زیر تبدیل کرد:

$$\begin{bmatrix}n_{xx}\\n_{yy}\\n_{zz}\\n_{yz}\\n_{xz}\\n_{xy}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}n_0\\n_0\\n_0\\0\\0\\0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}c_1&c_2&c_3&0&0&0\\c_2&c_1&c_2&0&0&0\\c_2&c_2&c_1&0&0&0\\0&0&0&c_3&0&0\\0&0&0&0&c_3&0\\0&0&0&0&0&c_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_{xx}\\\sigma_{yy}\\\sigma_{zz}\\\sigma_{yz}\\\sigma_{xz}\\\sigma_{xy}\end{bmatrix} \quad (2)$$

که n_{ij} ضریب شکست در راستای ij را نشان می‌دهد، n_0 ضریب شکست در فشار صفر و σ_{ij} فشار در راستای ij می‌باشد. فرض می‌شود که فشار در یک راستا به کریستال اعمال می‌شود، بنابراین خواهیم داشت: $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{zz}=\sigma$ و $\sigma_{xy}=\sigma_{xz}=\sigma_{yz}=0$.

برای ضریب شکست، تحت فشار σ خواهیم داشت:

$$n=n_0-(c_1+2c_2)\sigma \quad (۳)$$

$$c_1=n_0^3(P_{11}-2VP_{12})/2E \quad (۴)$$

$$c_2=n_0^3[P_{12}-V(P_{11}+P_{12})]/2E \quad (۵)$$

که در این روابط E مدولاسیون یانگ و V نسبت پواسون می‌باشند. برای سیلیکن خواهیم داشت، E=۱۳۰GPa، V=۰/۲۵۵.

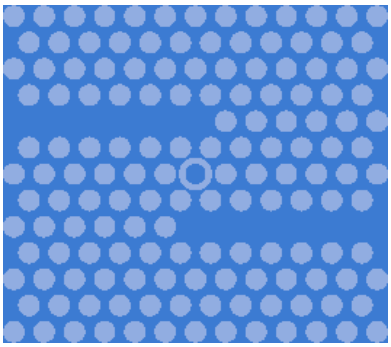
در یک کریستال نوری، شکاف باند نوری به ضریب

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-08-03]

شکست، ثابت شبکه و نسبت شعاع به ثابت شبکه (r/a) وابسته می‌باشد. در یک سنسور فشار کریستال نوری متشکل از موجبر و میکروکاواک، با اعمال فشار، بر اثر تغییر ضریب شکست ساختار، طول موج تشدید میکروکاواک تغییر کرده، در نتیجه می‌توان میزان تغییرات طول موج را به عنوان تابعی از فشار بدست آورد [۱۰].

۳- طراحی ساختار حسگر

ساختار حسگر طراحی شده (شکل ۱) از دو موجبر که با یک میکروکاواک تزویج شده‌اند، تشکیل گردیده است. موجبرها با حذف ۷ حفره از حفره‌های ردیف پنجم و نهم ساختار و میکروکاواک با جایگزین کردن حفره مرکزی با یک حلقه هوا به شعاع خارجی ۲۴۲nm و شعاع داخلی ۱۴۸nm ایجاد شده اند. طول این کریستال برابر ۵۵۹۶/۸nm و عرض آن برابر ۴۹۱۵nm است.

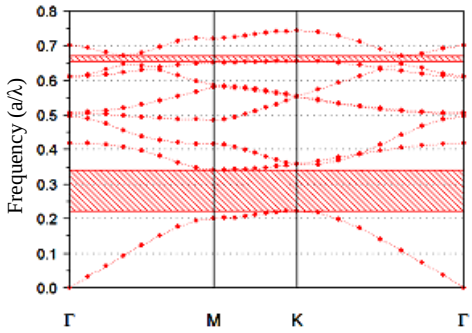


شکل۱: ساختار حسگر فشار با a=۴۴۰nm و شعاع حفره‌های هوای r=۱۵۸/۴، شعاع خارجی و داخلی میکروکاواک به کارگرفته شده به ترتیب ۲۴۲nm و ۱۴۸nm می‌باشند.

کریستال نوری طراحی شده دارای دو شکاف باند نوری مجزا در مود TM (یک شکاف باند کوچک در محدوده ۶۵۶ تا ۶۷۱ نانومتر و دیگری، شکاف باند بزرگی در محدوده ۱۲۹۰ تا ۱۹۸۰ نانومتر) می‌باشد، که در این طرح از شکاف باند بزرگ استفاده شده است. شکل ۲، نمودار شکاف باند ساختار را نشان می‌دهد.

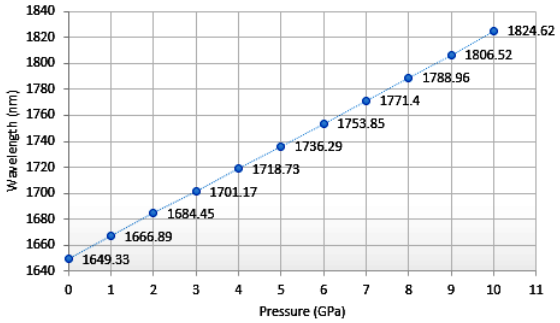
۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

برای بررسی اثر فشار بر روی طول موج تشدید شده در میکروکاواک از روش FDTD دو بعدی استفاده شده است. نور از سمت چپ وارد موجبر اول شده و آشکار ساز در انتهای سمت راست موجبر دوم، نور تزویج شده را آشکار



شکل ۲: نمودار شکاف باند در مود TM بر حسب فرکانس بهنجار شده (a/λ)

می‌کند. برای محاسبه طیف انتقال خروجی، حسگر را با یک موج پالس گوسی با محدوده ۱۸۵۰nm-۱۶۲۰ در ورودی موجبر سمت چپ تحریک کرده و در آشکار ساز طیف انتقال خروجی را دریافت می‌کنیم. برای این شبیه سازی شرایط مرزی به صورت PML در نظر گرفته شده است. طول موج تشدید محاسبه شده برای حالت بدون فشار ۱۶۴۹/۳۳nm می‌باشد. روابط ذکر شده در مورد تحلیل اثر فشار نشان می‌دهند که افزایش فشار اعمالی بر ساختار، ضریب شکست ساختار را افزایش می‌دهد.



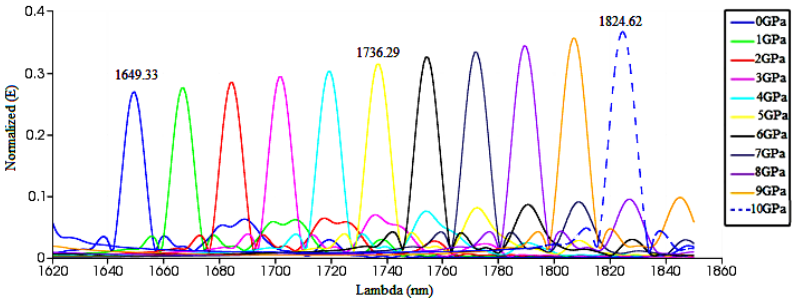
شکل ۳: منحنی تغییرات خطی طول موج بر حسب فشار اعمال شده

شکل ۳، نمودار تغییرات طول موج بر حسب فشار را نشان می‌دهد که بیانگر رابطه خطی مناسب بین فشار و طول موج تشدید در محدوده ذکر شده می‌باشد. با توجه به رابطه خطی مذکور، می توان پارامتر حساسیت که به صورت میزان تغییرات طول موج خروجی نسبت به فشار اعمالی ($\Delta\lambda/\Delta P$) تعریف می‌گردد، را از طریق شیب خط در شکل ۳، محاسبه نمود.

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta P}=\frac{۱۸۲۴/۶۲nm-۱۶۴۹/۳۳nm}{۱۰GPa}=۱۷/۵\frac{nm}{GPa} \qquad (6)$$

در حسگر پیشنهادی، مقدار متوسط ضریب کیفیت

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-08-03]



شکل ۴: طیف انتقالی خروجی برای تغییرات فشار از ۰ تا ۱۰ گیگاپاسکال

Q=۲۱۵۱/۳۶، حساسیت ۱۷/۵nm/GPa و رنج دینامیکی ۱۰GPa محاسبه شده است. در شکل ۴، نمودار تغییرات طول موج تشدید به ازای فشار صفر تا ۱۰ گیگاپاسکال، آمده است. در شکل مزبور، علاوه بر مود اصلی، مودهای جانبی هم وجود دارد، اما به دلیل داشتن میزان حذف مود جانبی (SMSR) بسیار بالا و توان خروجی بسیار کم این مودهای جانبی (متوسط ۱۵٪ توان مود اصلی)، این مودها قابل اغماض بوده و در نتیجه در کیفیت عملکرد حسگر تأثیر قابل توجهی نخواهند داشت. ضمن آنکه اگر از حسگر، برای فشارهای مختلف در محدوده طول موج‌های خاصی استفاده شود، این مودها به طور کلی حذف می‌شوند. در طرح پیشنهادی سعی شده است هر سه ویژگی حساسیت، ضریب کیفیت و رنج دینامیکی به طور همزمان بهبود داده شوند. در جدول ۱، عملکرد طرح پیشنهادی و طرح‌های پیشین مقایسه شده اند. با توجه به اینکه تغییرات ضریب شکست باعث تغییر در ضریب کیفیت می‌گردد، در طرح Krishnan و طرح پیشنهادی ضریب کیفیت به صورت بازه‌ای گزارش شده است. با توجه به نتایج موجود در جدول، طرح پیشنهادی، دارای حساسیت بالاتر، ضریب کیفیت بهتر نسبت به طرح‌های پیشین می‌باشد، ضمن آنکه رنج دینامیکی آن نیز برابر و یا بهتر از سایر طرح‌ها می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با طرح‌های موجود

مقاله	حساسیت (nm/GPa)	ضریب کیفیت	رنج دینامیکی
Stomeo [۴]	۵/۸۲	-	۵
Olyaee [۱۰]	۸	۱۴۷۰	۱۰
Olyaee [۹]	۱۱/۷	۱۱۵۰۸/۴۶	۲
Olyaee [۵]	۱۶	۱۵۰۰	۱۰
Krishnan [۱۲]	۲	۵۲/۵–۷۷۲/۵	۷
طرح پیشنهادی	**۱۷/۵**	**۱۸۷۰–۲۳۴۱**	**۱۰**

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک نمونه حسگر فشار بر مبنای کریستال نوری دو بعدی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. حسگر از دو موجبر مجزای تزویج شده با یک میکروکاواک تشکیل گردیده است. با اعمال فشار، طول موج تشدید شده در میکروکاواک به صورت خطی افزایش یافته که این امر اساسی‌ترین ایده در مورد سنسورهای فشار کریستال نوری می‌باشد. ضریب کیفیت حسگر پیشنهادی، Q=۲۱۵۱/۳۶، حساسیت آن ۱۷/۵nm/GPa و محدوده دینامیکی آن ۱۰GPa می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که این حسگر، از عملکرد بهتری در قیاس با طرح‌های ارائه شده کنونی، برخوردار است.

مراجع

[1] Zhao, Yong, Ya-Nan Zhang, and Qi Wang. "*Research advances of photonic crystal gas and liquid sensors*." **Sensors and Actuators B: Chemical** 160.1 (2011): 1288-1297.

[2] Nair, Rajesh V., and R. Vijaya. "*Photonic crystal sensors: An overview*." **Progress in Quantum Electronics** 34.3 (2010): 89-134.

[3] Joannopoulos, John D., Pierre R. Villeneuve, and Shanhui Fan. "*Photonic crystals: putting a new twist on light*." **Nature** 386.6621 (1997): 143-149.

[4] Stomeo, T., et al. "*Fabrication of force sensors based on two-dimensional photonic crystal technology*." **Microelectronic Engineering** 84.5 (2007): 1450-1453.

[۵] سعید علیایی، اصغر دهقانی، "*طراحی و شبیه سازی حسگر فشار بر مبنای کریستال فوتونی دوبعدی با دقت بالا*"، **هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهارمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران**، دانشگاه تبریز، (۱۳۹۱)، ۲۷۰-۲۶۸.

[6] Ding, Wen-Hui, and Yi Jiang. ,"*Miniature photonic crystal fiber sensor for high-temperature measurement*", **IEEE SENSORS JOURNAL**, VOL. 14, NO. 3, (2014), 786-789.

[7] Padidar, S., V. Ahmadi, and M. Ebnali-Heidari., "*Design of High Sensitive Pressure and Temperature Sensor Using Photonic Crystal Fiber for Downhole Application*", **Photonics Journal, IEEE** 4.5 (2012): 1590-1599.

[8] Park, Bryan, et al. "*High temperature photonic crystal fiber tip sensor*." **Sensors, IEEE**, (2010), 970-974.

[9] Olyaee, Saeed, and Ali Asghar Dehghani., "*Nano-pressure sensor using high quality photonic crystal cavity resonator*", **Commyunication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)**, 8th International Symposium on IEEE, (2012).

[10] Olyaee, Saeed, and Ali Asghar Dehghani. "*High resolution and wide dynamic range pressure sensor based on two-dimensional photonic crystal*." **Photonic Sensors** 2.1 (2012), 92-96.

[11] Awad, H., et al. "*Gas sensing using slow light in photonic crystal waveguides*", **Fibre and Optical Passive Components (WFOPC)**, 7th Workshop on IEEE, (2011).

[12] Shanthi, Krishnan Vijaya, and Savarimuthu Robinson. "*Two-dimensional photonic crystal based sensor for pressure sensing*", **Photonic Sensors**, 4.3 (2014), 248-253.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-08-03]