

## شبیه‌سازی میکرو سنسور اندازه‌گیری با استفاده از بلور فوتونی

زهره درانی\*

مریی، گروه مهندسی برق، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: 1395/05/21 تاریخ پذیرش: 1395/09/19

## Simulation of Micro-displacement Sensor Using Photonic Crystals

Z. Dorrani\*

Lecturer, Department of Electrical Engineering, Payame Noor University

Received: 2016/08/11 Accepted: 2016/12/09

### Abstract

In this paper, we designed a micro-displacement sensor using of two-dimensional photonic crystal structures. This structure is a hexagonal that on each side located seven holes silicon. The holes made of air that have been arranged in silicon background. The holes have been arranged in a triangular arrangement. In this micro sensor, first by using the finite difference time domain simulation method, optimal values for frequency and lattice constant of photonic crystal were calculated. The intensity of propagating waves was obtained in two micrometers of left side of the structure. In the meantime, the output intensity is as a linear function of the displacement. the sensitivity was obtained as  $0.05\mu\text{m}^{-1}$ . The values of this structure showed that at a proper operating wavelength, the structure could be used as the micro - displacement sensor that also has very good sensitivity.

The micro - displacement sensor is an important measurement system in many applications such as the micro - electro - mechanical systems, aerospace, structure health monitoring, and many engineering fields.

### Keywords

Photonic Crystal, Finite Difference Time Domain Simulation, Sensitivity, Quality, Micro - Displacement Sensor.

### چکیده

در این مقاله با استفاده از ساختارهای بلور فوتونی دو بعدی، یک میکروسنسور جابه‌جایی طراحی کردیم. این ساختار شامل یک شش‌ضلعی است که در هر ضلع آن 7 حفره قرار گرفته است. جنس حفره‌ها هواست که در یک زمینه سیلیکونی قرار داده شده است. حفره‌ها در یک آرایش مثلثی چیده شده‌اند. در این میکروسنسور ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی روش تفاضل محدود حوزه زمان مقادیر بهینه فرکانس کاری و ثابت شیکه بلور فوتونی محاسبه شد. شدت موج منتشر شده در فاصله دو میکرومتری سمت چپ ساختار به دست آمد. در این فاصله تغییرات موج منتشر شده نسبت به جابجایی تغییرات خطی داشت. حساسیت این سنسور  $0.05\mu\text{m}^{-1}$  به دست آمد. بنابر مقادیر به دست آمده این ساختار در طول موج مناسب قابلیت استفاده به عنوان میکروسنسور را دارد که از حساسیت بسیار خوبی نیز برخوردار است.

این میکروسنسور جابجایی در سیستم‌های اندازه‌گیری مانند سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، فضایی - هوایی، مانیتورینگ سلامتی و نیز در بسیاری از حوزه‌های مهندسی کاربرد دارد.

### واژگان کلیدی

بلور فوتونی، شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمان، حساسیت، کیفیت، میکروسنسور جابه‌جایی.

## مقدمه

بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که خواص اپتیکی آنها از قبیل ضریب شکست و ضریب نفوذپذیری الکتریکی در یک جهت به طور متناوب تغییر می‌کند و در جهات دیگر ثابت است. شکاف باند موجود در این ساختارها مانع انتشار امواج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های معینی می‌شود [6-8].

بلورهای فوتونی کاربردهای گسترده‌ای دارند. از جمله آنها می‌توان به ساخت پوشش‌های با قابلیت انعکاس بالا و پایین در آینه‌ها و لنزها اشاره کرد که با استفاده از بلورهای فوتونی یک بعدی امکان‌پذیر است [1]. بلورهای فوتونی دو بعدی از لحاظ کاربرد اهمیت بیشتری دارد. فیبرهای بلور فوتونی از جمله این کاربردها است [2].

در بلورهای فوتونی می‌توان با ایجاد نقص‌های صفحه‌ای و خطی، موجبر و کاواک‌هایی با ضریب کیفیت بسیار بالا ساخت یا با استفاده از ضریب شکست منفی، می‌توان خواص جالبی مانند نامرئی‌سازی را مشاهده کرد [9].

همچنین با استفاده از ساختارهای مبتنی بر نقطه کوانتومی و موجبرهای بلور فوتونی، منابع تک فوتونی ایجاد شده است [3 و 4].

میکروسنسور جابه‌جایی در سیستم‌های اندازه‌گیری مانند سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، فضایی - هوایی، مانیتورینگ سلامتی و نیز در بسیاری از حوزه‌های مهندسی کاربرد دارد [10 و 11]. تحقیقات بسیاری در جهت اندازه‌گیری فاصله با استفاده از سنسورهای بلور فوتونی و لیزر انجام شده است [12 و 13] چرا که این ساختارها در اندازه‌گیری دقیق فاصله بسیار قدرتمند عمل می‌کنند [14 و 15].

در ده‌های اخیر، از این ساختارها جهت کاربردهای حساسی استفاده شده است. از ویژگی‌های این ساختارها می‌توان به سائز کوچک، حساسیت بالا و گستره فرکانسی زیاد اشاره کرد [16]. همچنین طراحی‌های متنوعی برای میکروسنسورها بلور فوتونی مطرح شده است.

از انواع سنسورهای بلور فوتونی می‌توان به سنسور بلور فوتونی با استفاده از کاواک تشدید اشاره کرد که حساسیت آن در  $1a^{-1}$  است و  $a$  ثابت شبکه است [17]. این سنسور به آشکارساز نیاز دارد، ساختار آن بسیار ساده و فاکتور کیفیت چهل است.

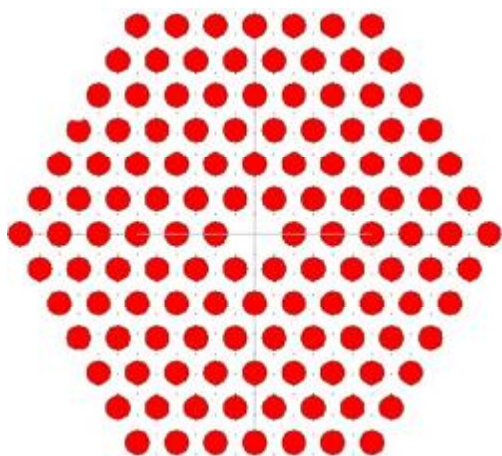
همچنین در مرجع [18] سنسوری با استفاده از بلور فوتونی طراحی شده که می‌تواند گلوکز را اندازه‌گیری کند. این سنسور با نانو سیم‌های نقره پر شده و حساسیت  $19009.17 \text{ nm/RIU}$  دارد.

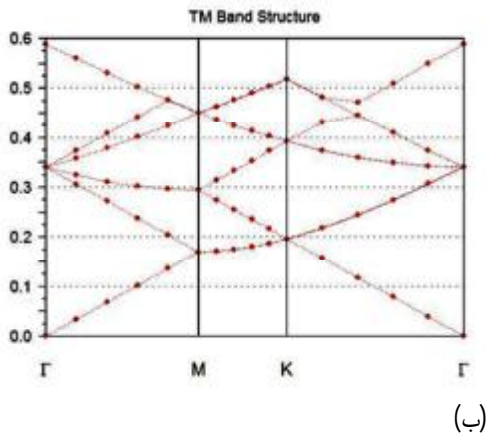
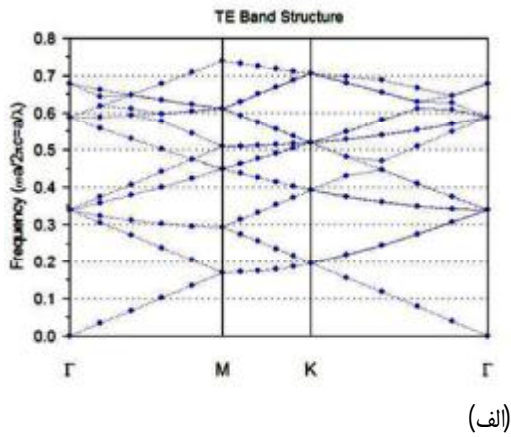
در این مقاله با استفاده از بلورهای فوتونی ساختار سنسوری مطرح شده که می‌تواند در فرکانس و طول موج عملگر مناسب، جابجایی را اندازه بگیرد.

با استفاده از روش شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمان شدت انتشار برحسب فاصله به دست می‌آید و در نهایت با روابط تحلیل می‌شود.

## آنالیز سنسور طراحی شده

سطح مقطع ساختار طراحی شده، در شکل 1 نمایش داده شده است. بلور فوتونی مورد نظر یک ساختار شش ضلعی متشکل از حفره‌های دایره‌ای شکل است که در یک آرایش مثلثی چیده شده است. جنس زمینه، سیلیکون است که با توجه به مقدار ثابت دی‌الکتریک ضریب شکست آن با استفاده از رابطه 1 قابل محاسبه است [5].

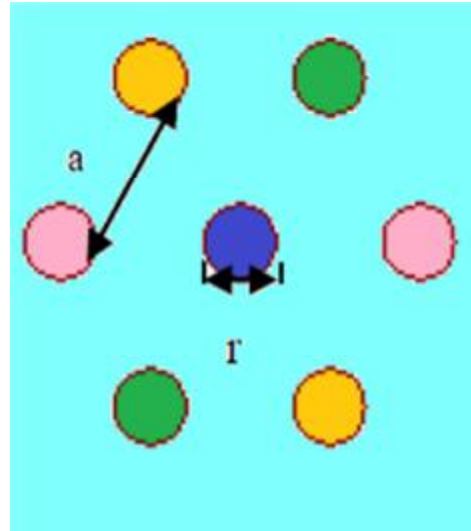




شکل 2. ساختار باند برای آرایش بلور فوتونی برای مدهای الف (TE، ب) TM

در سمت چپ این ساختار یک منبع نور قرار داده می‌شود. نور در ساختار منتشر و شدت انتقال در فواصل مختلف اندازه‌گیری می‌شود چنانچه شدت انتقال در فواصل مختلف متغیر باشد، در یک فرکانس مناسب و مشخص، این ساختار می‌تواند به عنوان سنسور جابه‌جایی مورد استفاده قرار گیرد.

ضرایب انتقال در فرکانس‌های مختلف می‌تواند با استفاده از تابع لورنتز به دست آید [6].



شکل 1. ساختار بلور فوتونی: شش ضلعی با هفت حفره در هر ضلع. حفره‌ها در زمینه سیلیکون و در آرایش مثلثی چیده شده‌اند. شعاع هر حفره  $r = 0.3 * a$  است.

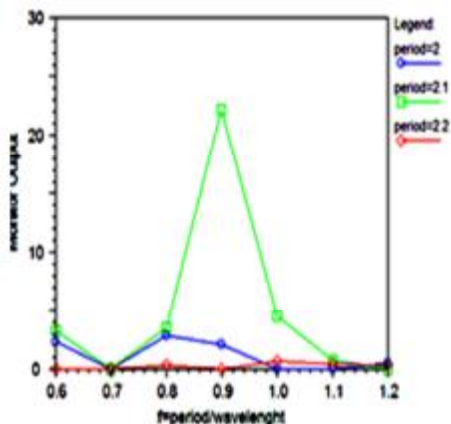
$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (1)$$

$$n = \sqrt{11.56} = 3.4$$

در این سنسور یک نقص با حذف حفره مرکزی ایجاد شده است.

ساختار باند این بلور فوتونی برای مود TE و TM به ترتیب در شکل 2 (الف) و 2 (ب) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌شود هیچ شکاف باندی در شکل وجود ندارد.

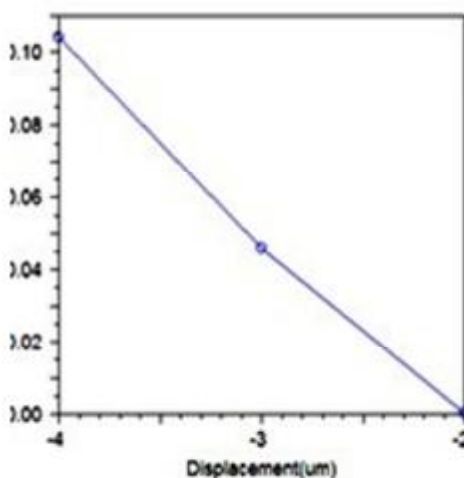
شکاف باند مانع انتشار امواج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های معینی می‌شود. نبود شکاف باند به منزله انتشار موج در تمامی فرکانس‌هاست. پس با استفاده از محاسبات که در ادامه مطرح شده می‌توان فرکانس کاری را به دست آورد.



شکل 3. پاسخ فرکانسی در محدوده 0.6 تا 1.2 نرمالیز شده به ازای سه ثابت شبکه شامل  $a = 2$  به رنگ آبی،  $a = 2.1$  به رنگ سبز و  $a = 2.2$  به رنگ قرمز

با توجه به نتایج به دست آمده در شکل 3 فرکانس نرمالیزه  $f = 0.9 \frac{a}{\lambda}$  در  $a = 2.1$  بهترین پاسخ است. بنابراین فاکتور Q قابل محاسبه است:

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2.3\mu\text{m}}{0.01\mu\text{m}} = 230 \quad (6)$$



شکل 4. رابطه بین شدت خروجی و جابه‌جایی

$$T(\omega, \omega_0) = \frac{\left(\frac{\omega_0}{2Q}\right)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{\omega_0}{2Q}\right)^2} \quad (2)$$

در این رابطه  $\omega_0$  فرکانس تشدید و  $Q$  کیفیت است. زمانی که مانیتور اندازه‌گیری شدت انتقال را در طول محور  $x$  شیفت دهیم، تغییرات ضریب انتقال برابر است با [1]:

$$\Delta T(\Delta x) = \Delta T(x + \Delta x) - T(x) \quad (3)$$

که  $\Delta x$  میزان جابه‌جایی مانیتور است. با استفاده از سری تیلور داریم:

$$\Delta T(\Delta x) = T'(x) \cdot \Delta x + \frac{T''(x)}{2} \cdot \Delta x^2 + Q(\Delta x) \quad (4)$$

در صورتی که فرکانس مناسب انتخاب شود،  $T''(\omega_0, \omega_1) \approx 0$  می‌شود و  $\Delta T(\Delta x)$  می‌تواند با رابطه زیر تعیین شود [1]:

$$s = \Delta T / \Delta x \quad (5)$$

$\Delta T$  شدت انتقال و  $\Delta x$  میزان جابه‌جایی مانیتور اندازه‌گیری شدت انتقال است. در این شبیه‌سازی فرکانس کاری ساختار باید تعیین شود، تا بهترین پاسخ به دست آید. برای رسیدن به این منظور می‌توان فرکانس تشدید را به دست آورد. علاوه بر آن شعاع هر حفره  $R = 0.3 * a$  است که  $a$  ثابت شبکه و فاصله بین دو مرکز حفره است. برای به دست آوردن بهترین ثابت شبکه و فرکانس، تغییرات شدت انتقال به ازای فرکانس برای 3 ثابت شبکه شامل  $a = 2, a = 2.1, a = 2.2$  در شکل 3 نمایش داده شده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

یک میکروسنسور جابه‌جایی با استفاده از بلورهای فوتونی دوبعدی در این مقاله مطرح شد. ساختار مورد نظر یک شش ضلعی متشکل از حفره در زمینه دی‌الکتریک سلیکونی است که در آرایش مثلثی چیده شده است.

در این سنسور با به دست آوردن فرکانس کاری و ثابت شبکه مناسب حساسیت  $0.05 \mu\text{m}^{-1}$  به دست آمد. بنابراین در یک ساختار مناسب و فرکانس کاری مطلوب، این ساختار بلور فوتونی می‌تواند به عنوان یک میکروسنسور جابه‌جایی با حساسیت بالا مورد استفاده قرار گیرد.

انتشار امواج در ساختار و شدت خروجی که تابع خطی از فاصله است در شکل 4 نمایش داده شده است. حساسیت می‌تواند با استفاده از شکل 4 محاسبه شود [14]:

$$s = \left| \frac{0.1 - 0}{-4 - (-2)(\mu\text{m})} \right| = 0.05 \mu\text{m}^{-1} \quad (7)$$

### منابع

- [1] درانی، زهره؛ منصوری بیرجندی، محمدعلی؛ ساخت آینه در بلورهای فوتونی دو بعدی، فیزیک کوانتومی 1، 1394، 52-47
- [2] درانی، زهره؛ منصوری بیرجندی، محمدعلی؛ محدوده بسامدی ضریب شکست منفی، چهارمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران، گناباد، 1391.
- [3] درانی، زهره؛ منصوری بیرجندی، محمدعلی؛ میکروسنسور، با استفاده از ضریب شکست منفی در [11] D. Yang, H. Tian, and Y. Ji, Micro-displacement sensor based on high-Q nanocavity in slot photonic crystal. Optical Engineering 50 (2011) 544021–544026.
- [12] O. Levy, B. Z. Steinberg, M. Nathan, and A. Boag, Ultrasensitive displacement sensing using photonic crystal waveguides. Applied Physics Letters 86, (2005) 104102–104104.
- [13] S. Olyae, S. Hamed, and Z. Dashtban, Design of electronic sections for nano-displacement measuring system. Frontiers of Optoelectronics in China 3 (2010) 376–381.
- [14] S. Olyae and S. M. Nejad, Design and simulation of velocity and displacement measurement system with subnanometer uncertainty based on a new stabilized laser Doppler-interferometer. The Arabian Journal for Science and Engineering 32 (2007) 89–99.
- [6] D. Joannopoulos, et al, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Princeton University Press, second edition, (2008).
- [7] Z. Dorrani and M. A. Mansouri-Birjandi, Superlens Biosensor with Photonic Crystals in Negative Refraction, IJCSI 9 (2012) 57-60.
- [8] Z. Dorrani, Optical Supertrap with complete photonic lens, Majlesi Journal of Electrical Engineering 3,( 2015) 91-94.
- [9] G. Woon Siong, Acoustical Imaging: Techniques and Applications for Engineers, Negative Refraction, Acoustical Metamaterials and Acoustical Cloaking, John Wiley & Sons (2012) 343-368.
- [10] Z. Xu, L. Cao, C. Gu, Q. He, and G. Jin, Micro-displacement sensor based on line-defect resonant cavity in photonic crystal. Optics Express 14 (2006) 298–305.

- [15] S. Olyae and A. A. Deghani, High resolution and wide dynamic range pressure sensor based on two-dimensional photonic crystal. *Photonic Sensors* 2 (2012) 92–96.
- [16] S. Olyae, A. Naraghi, and V. Ahmadi, High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring. *Optik* 125 (2014) 596–600.
- [17] S. Olyae, and M. Azizi, Micro-Displacement Sensor Based on High Sensitivity Photonic Crystal. *Photonic Crystals* 4 (2014) 220–224.
- [18] X.C. Yang, Y. Lun, M.T. Wang, J.Q. Yao, A photonic crystal fiber glucose sensor filled with silver nanowires, *Optics Communications* 359 (2016) 279–284.