

طراحی حسگر تشدید سطح پلاسمون با استفاده از بلورهای فوتونی

زهره درانی*

کارشناسی ارشد، مربی، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: 1396/02/04 تاریخ پذیرش: 1396/06/13

Designing Sensor based Surface Plasmon Resonance with Photonic Crystals

Z. Dorrani*

MS.c, Lecturer, Department of Physics, Payame Noor University

Received: 2017/04/24 Accepted: 2017/09/04

Abstract

In this paper, surface Plasmon sensor was designed by using structures of two-dimensional photonic crystal. This structure is a hexagonal arrange that on each side located 7 circular holes. The circular holes made of air that have been arranged in silicon background and the holes have been arranged a triangular arrangement.

The new arrangement makes with defects in the structure center and added new silver bar. Using of the finite difference time domain (FDTD) simulation method on this structure were calculated the propagation loss per wavelength.

By changing the refractive index in sensitive area, resonance will happen in the wavelength. By changing the refractive index in sensitive are, the wavelength that resonance happens in it, will change and shift. This feature makes the structure ready to use by sensor.

This sensor, depending on the type of sensitive material can be used in different systems and wide range. For examples: environment monitoring, liquid and gas detection and also medical diagnostics.

Keywords

Photonic Crystal, Sensor, Finite Difference Time Domain Simulation, Surface Plasmon Resonance.

چکیده

در این مقاله با استفاده از ساختارهای بلور فوتونی دو بعدی، حسگر پلاسمون سطحی طراحی شده است. این ساختار، آرایه‌ای شش ضلعی است که در هر ضلع آن، 7 حفره دایروی قرار گرفته است. جنس حفره‌های دایروی از هواست که در یک زمینه سیلیکونی قرار داده شده است و حفره‌ها در یک آرایش مثلثی چیده شده‌اند. با ایجاد نقص در مرکز ساختار و اضافه کردن میله‌هایی از جنس نقره، آرایش جدیدی ایجاد می‌شود.

با استفاده از شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمان¹¹ (FDTD) روی این ساختار، تلفات برحسب طول موج به دست می‌آید. با تغییر ضریب شکست ناحیه حساس، تشدید در یک طول موج اتفاق می‌افتد. در صورت تغییر ضریب شکست ناحیه حساس، طول موجی که در آن تشدید اتفاق می‌افتد تغییر می‌کند و شیف‌ت می‌یابد. این ویژگی، ساختار را برای استفاده حسگر مناسب می‌کند.

این حسگر، بسته به نوع ماده حساس در سیستم‌های مختلف برای کاربردهای گسترده‌ای استفاده قرار می‌شود که از این میان می‌توان به مانیتورینگ محیط، تشخیص مایعات و گازها و نیز تشخیص پزشکی اشاره کرد.

واژگان کلیدی

بلور فوتونی، حسگر، شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمان، تشدید سطح پلاسمون.

مقدمه

قطبش دیگر به ازای ضخامت‌های خاص و معینی می‌تواند دارای ضریب تراگسیل کامل باشد [3].

بلورهای فوتونی دوبعدی در ساخت آینه [4 و 5] و ایجاد شکست منفی [6] و میکروسنسور [7] کاربرد دارد. به علاوه بلورهای فوتونی کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف دارد، تارهای بلور فوتونی، در صنعت مخابرات، کمترین میزان افت حفرشدگی را دارد [8].

بلور فوتونی سه گانه یک بعدی طراحی شده است که پهنای شکاف باند آن با افزایش دما افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه تابش پرتو، پهنای شکاف باند بلور فوتونی در دمای ثابت علاوه بر افزایش پهنای به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر پیش می‌رود [9].

موج‌بر بلور فوتونی با نقص خطی بررسی شده است که مشخصه‌های نور کند را با تکنیک تزریق سیال نوری در حفره‌های هوا بهبود می‌دهد. در این موج‌بر با افزایش ضریب شکست سیال نوری تزریق شده به حفره‌های دایروی هوا، مشخصه‌های نور کند، بهبود می‌یابند [10].

بلورهای فوتونی در ابعاد نانو نیز کاربرد دارد. با تابش پرتو گاوسی به یک نانوبلور فوتونی یک بعدی با ساختار هندسی پادمتقارن، ویژگی فیلتر چند گانه ایجاد می‌شود [11].

بلور فوتونی بر مبنای تشدید پلاسمون نیز طراحی شده است که خاصیت حسگری دارد [12].

در این مقاله، ساختار بلور فوتونی دو بعدی با ویژگی حسگر پلاسمون بررسی می‌شود و با استفاده از روش شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمان، شدت تلفات بر حسب طول موج به دست می‌آید.

طراحی ساختار سنسور

سطح مقطع ساختار طراحی شده در شکل 1 نمایش داده شده است. بلور فوتونی مدنظر یک ساختار شش ضلعی تشکیل شده از حفره‌های دایروی شکل است که در یک آرایش مثلثی چیده شده‌اند.

در این ساختار یک نقص با حذف حفره مرکزی و دو شش ضلعی داخلی ایجاد شد. پس از ایجاد نقص در اولین شش ضلعی داخلی حفره‌های جدیدی به اندازه نصف شعاع حفره‌های موجود از جنس نقره قرار داده شد. ساختار مدنظر،

برهمکنش امواج الکترومغناطیس در ناحیه مرئی با الکترون‌های آزاد نانوذرات طلا و نقره، مد ارتعاش جمعی الکترون‌های آزاد فصل مشترک فلز و دی‌الکتریک پدیده تشدید پلاسمون سطحی (SPR)¹² را ایجاد می‌کند. این پدیده را، اولین بار، لیدبرگ و همکارانش برای آشکارسازی استفاده کردند [12].

تشدید پلاسمون سطحی کاربردهای گسترده‌ای در اپتیک و فوتونیک [13]، شناسایی و آشکارسازی مواد، گازهای شیمیایی و مولکول‌های بیولوژیکی دارد. کاربرد این پدیده به‌ویژه در طراحی سنسورها [14-16] توجه زیادی به خود جلب کرده است که دلیل آن دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد؛ از قبیل حساسیت بالا و طیف گسترده برنامه‌های کاربردی از جمله نظارت بر محیط زیست [17]، ایمنی مواد غذایی، تست آب، تشخیص مایع و گاز [12]، حسگرهای پزشکی [18]، و کاربرد در تشخیص پزشکی [19]، است.

سنسور فیبر نوری بر پایه تشدید پلاسمون سطحی با نانو لایه‌های فلزی که در طول محیط حساس (دی‌الکتریک)، هسته را پوشش می‌دهند، طراحی شده است [1].

بلورهای فوتونی، ساختارهای متناوبی هستند و شکاف باند موجود در این ساختارها، مانع انتشار امواج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های معینی می‌شود [2].

بلورهای فوتونی در آرایش‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی دیده می‌شوند که هر کدام از این آرایش‌ها کاربرد خاصی دارند.

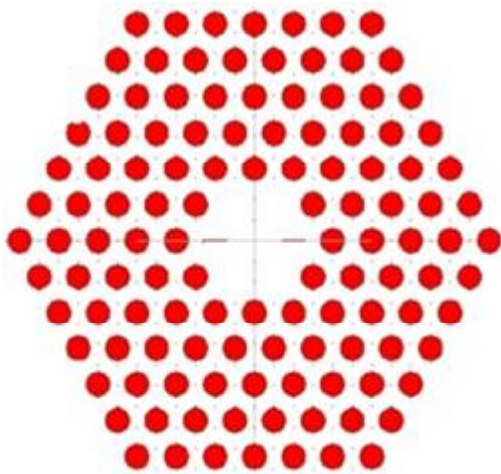
بلورهای فوتونی یک بعدی، لایه‌های متناوب دو یا چند لایه اپتیکی هستند که ثابت دی‌الکتریک متفاوتی دارند. ویژگی‌های تراگسیلی بلور فوتونی یک بعدی، حاوی لایه نقص مگنتواپتیکی با اپسیلون - نزدیک - صفر و با تغییر المان قطری تانسور گذردهی الکتریکی لایه نقص، ساختاری ایجاد می‌کند که این ساختار برای یکی از قطبش‌های دایروی غیر شفاف است، در صورتی که برای

شبیه‌سازی

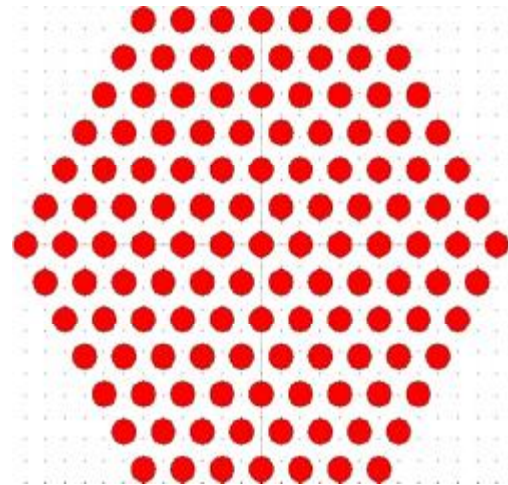
ابتدا میله‌های داخلی را از جنس طلا قرار می‌دهیم و سپس تلفات را برحسب طول موج به دست می‌آوریم.

پس از ایجاد تغییرات ذکر شده در بالا در شکل 2.الف و 2.ب نمایش داده شده است.

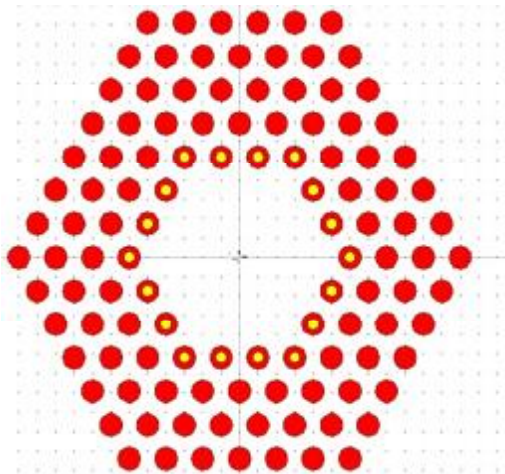
جنس زمینه سیلیکون است که با توجه به مقدار ثابت دی‌الکتریک، ضریب شکست آن از رابطه 1 محاسبه می‌شود [3].



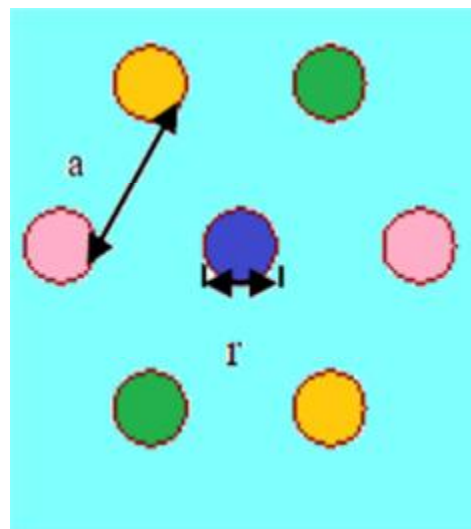
(الف)



(الف)



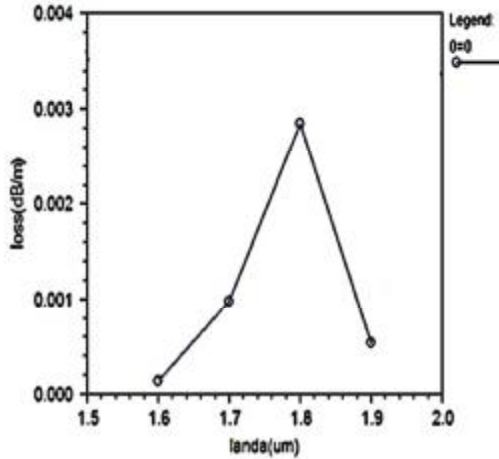
(ب)



(ب)

شکل 2. الف) ایجاد نقص در ساختار بلور فوتونی؛ ب) اضافه کردن میله‌های طلا به رنگ زرد با شعاع $r = 0.15 * a$.

شکل 1. الف) ساختار بلور فوتونی: شش ضلعی با 7 حفره در هر ضلع. حفره‌ها در زمینه سیلیکون و در آرایش مثلثی چیده شده‌اند. ب) شعاع هر حفره $r = 0.3 * a$ است.



شکل 4. انتشار تلفات برحسب طول موج با تغییر ضریب شکست ناحیه حساس؛ در طول موج $\lambda = 1.8\mu m$ تشدید اتفاق می‌افتد.

ضریب شکست ناحیه حساس را افزایش داده و نتایج شبیه‌سازی را به ازای مقدار جدید به دست می‌آوریم. مطابق شکل 4، با افزایش ضریب شکست ناحیه حساس، طول موج تشدید افزایش می‌یابد و در طول موج $1.8\mu m$ اتفاق می‌افتد. شرط تشدید موج پلاسمون سطحی با رابطه زیر تعیین می‌شود [1].

$$\frac{2\pi}{\lambda} n \sin\theta = \text{Re}\{K_{sp}\} \quad (2)$$

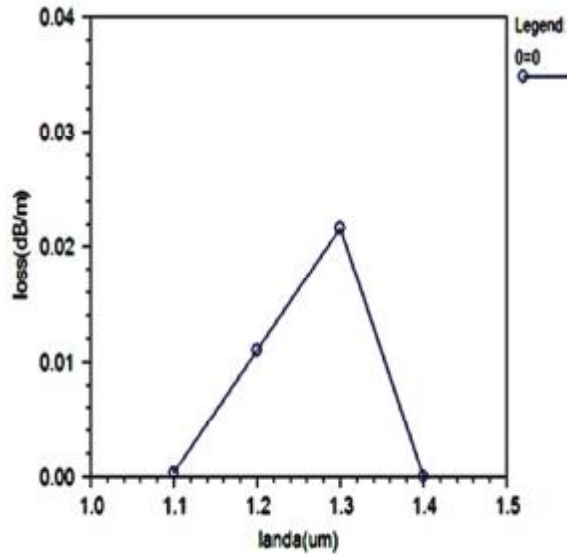
$$K_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s}} \quad (3)$$

ثابت انتشار پلاسمون سطحی، C سرعت نور در خلا، n ضریب شکست، ϵ ضریب دی‌الکتریک و θ زاویه تابش موج است.

افزایش طول موج تشدید با ضریب شکست محیط حساس می‌تواند با تغییرات ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی توجیه شود. براساس رابطه بالا، بخش حقیقی ثابت انتشار امواج سطحی، در تعیین شرایط تشدید نقش اساسی دارد. برای ضرایب شکست کوچک‌تر محیط حساس، بخش حقیقی ثابت انتشار کوچک‌تر است. برای ضرایب شکست بزرگ‌تر محیط حساس، شرایط تشدید در طول موج بزرگ‌تر اتفاق می‌افتد.

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

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



شکل 3. انتشار تلفات برحسب طول موج، در طول موج $\lambda = 1.3\mu m$ تشدید اتفاق می‌افتد.

همان طور که در شکل مشاهده می‌کنیم تشدید در طول موج حدود $1.3\mu m$ اتفاق می‌افتد. دو روش برای بررسی تشدید پلاسمون سطحی وجود دارد.

روش اول بررسی زاویه‌ای نامیده می‌شود و بدین شکل است که طول موج تابشی ثابت نگه داشته شده و زاویه تابش متغیر در نظر گرفته می‌شود. در زاویه تابشی که تشدید اتفاق می‌افتد، نور بازتاب شده با تلفات شدید همراه می‌شود.

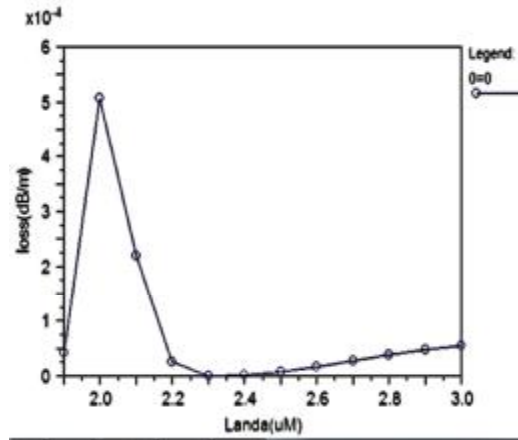
در روش دوم که روش بررسی طیفی است، زاویه تابش ثابت است؛ اما طول موج نور تابشی تغییر می‌کند و تشدید در یک طول موج خاص اتفاق می‌افتد. در این مقاله از روش دوم استفاده شده است.

با تغییر ضریب شکست ناحیه حساس، این ساختار می‌تواند کاربردهای گوناگونی داشته باشد. به عنوان مثال این حسگر برای تشخیص نشت گاز بوتان می‌تواند استفاده شود. در حالت عادی، ضریب شکست ناحیه حساس که از هوا پر شده، 1 است؛ با نشت گاز بوتان، ضریب شکست ناحیه حساس از 1 به 1.3803 [20] می‌رسد و در نتیجه طول موجی که تشدید در آن اتفاق می‌افتد، تغییر می‌کند.

بحث و نتیجه‌گیری

یک حسگر بلور فوتونی دوبعدی مبتنی بر تشدید سطح پلاسمون در این مقاله مطرح شد. ساختار مدنظر یک شش ضلعی متشکل از حفره‌های دایروی در زمینه دی‌الکتریک سیلیکونی بود که در آرایش مثلثی چیده شد. با ایجاد نقص و اضافه کردن میله‌هایی از جنس نقره، محیط حساس در مرکز ساختار ایجاد شد. نتایج شبیه‌سازی، تلفات برحسب طول موج را نشان داد که در آن تشدید در طول موج خاصی اتفاق افتاد. با تغییر ضریب شکست ناحیه حساس، طول موج تشدید جابجا شد؛ همین ویژگی منجر به استفاده حسگری از این ساختار بلور فوتونی شد که با توجه به نوع ماده حساس، کاربردهای گوناگونی دارد.

در ادامه با افزایش ضریب شکست محیط حساس، تغییرات را مشاهده می‌کنیم.



شکل 5. انتشار تلفات برحسب طول موج با تغییر ضریب شکست ناحیه حساس؛ در طول موج $\lambda = 2\mu m$ تشدید اتفاق می‌افتد.

براساس نتایج شبیه‌سازی، با توجه به حساس بودن محیط به ضریب شکست، می‌توان نتیجه گرفت که این ساختار بلور فوتونی مانند سنسور عمل می‌کند.

منابع

- [1] محرمی، مهسا و محمد کوهی، بررسی حساسیت سنسور فیبر نوری بر اساس تشدید پلاسمون سطحی بانانو لایه‌های فلزی، بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، 1393، صفحه 133-136.
- [2] زهره درانی، شبیه‌سازی میکروسنسور اندازه‌گیری با استفاده از بلور فوتونی، اپتوالکترونیک، دوره 1، شماره 1، 1395، صفحه 17-22.
- [3] رضا عبدی قلعه؛ رضا سلدوزی؛ امیر مدنی؛ وحید فالاحی، خواص تراگسلی بلورهای فوتونی یک بعدی شامل لایه نقص مگنتوپتیکی با اپسیلون - نزدیک - صفر، اپتوالکترونیک، دوره 1، شماره 1، تابستان 1395، صفحه 7-14.
- [4] درانی، زهره؛ منصوری بیرجندی، محمدعلی؛ ساخت آینه در بلورهای فوتونی دو بعدی، فیزیک کوانتومی 1، 1394، 47-52.
- [5] درانی، زهره؛ کندری، حمیده؛ آینه کامل در بلورهای فوتونی با شکست منفی، ششمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران، گناباد، 1393.
- [6] درانی، زهره؛ منصوری بیرجندی، محمدعلی؛ محدوده بسامدی ضریب شکست منفی، چهارمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران، گناباد، 1391.
- [7] درانی، زهره؛ منصوری بیرجندی، محمدعلی؛ میکروسنسور، با استفاده از ضریب شکست منفی در بلورهای فوتونی دو بعدی، هفدهمین کنفرانس انجمن و اپتیک فوتونیک ایران، کرمان، 1389.
- [8] حسن پاک‌زاده؛ رضوان درخشان، تأثیر پارامترهای ساختاری بر مشخصه‌های مد تارهای بلور فوتونی در ناحیه مخابراتی، اپتوالکترونیک، دوره 1، شماره 1، پاییز 1395، صفحه 9-16.

- [9] طاهره فروتن فرد کمار علیا؛ علی واحدی، مطالعه وابستگی دمایی بلور فوتونی سه گانه دی الکتریک- بلورمایع- دی الکتریک در یک بعد با ضخامت های مختلف، اپتوالکترونیک، دوره 1، شماره 1، تابستان 1395، صفحه 29-34.
- [10] داود جعفری؛ مرتضی مختاری قلندری؛ مصطفی صحرانی، نور کند در موج بر بلور فوتونی پر شده با سیال crystal fiber based plasmonic sensor, Opt. Express 20 (2012) 25858-25866.
- [11] ربابه طالبزاده؛ مهرداد باوقار، فیلترهای تنظیم پذیر چندکاناله مبتنی بر نانوبلور فوتونی ابررسانا تحت تابش پرتو گاوسی، اپتوالکترونیک، دوره 1، شماره 1، تابستان 1395، صفحه 47-50.
- [12] A. Ahmmed, et. al, Photonic crystal fiber based plasmonic sensors. Sensors and Actuators B 243 (2017) 311-325.
- [13] L. Wang, R.J.H. Ng, S. Safari Dinachali, M. Jalali, Y. Yu, J.K. Yang, Large area plasmonic color palettes with expanded gamut using colloidal self-Assembly, ACS Photonics (2016).
- [14] A.A. Rifat, G. Mahdiraji, Y.M. Sua, R. Ahmed, Y. Shee, F.M. Adikan, Highly sensitive multi-core flat fiber surface plasmon resonance refractive index sensor, Opt. Express 24 (2016) 2485-2495
- [15] R. Ahmed, A.A. Rifat, A.K. Yetisen, S.H. Yun, S. Khan, H. Butt, Mode-multiplexed waveguide sensor, J. Electromagn. Waves Appl. 30 (2016) 444-455.
- [16] B. Shuai, L. Xia, D. Liu, Coexistence of positive and negative refractive index sensitivity in the liquid-core photonic
- [17] A. Nooke, U. Beck, A. Hertwig, A. Krause, H. Krüger, V. Lohse, et al., On the application of gold based SPR sensors for the detection of hazardous gases, Sens. Actuators B 149 (2010) 194-198.
- [18] C.E. Berger, J. Greve, Differential SPR immunosensing, Sens. Actuators B 63 (2000) 103-108.
- [19] T.T. Goodrich, H.J. Lee, R.M. Corn, Direct detection of genomic DNA by enzymatically amplified SPR imaging measurements of RNA microarrays, J. Am. Chem. Soc. 126 (2004) 4086-4087.
- [20] Z. Dorrani, M. A. Mansouri-Birjandi, Superlens Biosensor with Photonic Crystals in Negative Refraction, International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 3, No 1, (2012), 57-60.