عملکرد حسگر بلور فوتونی با نانولایه های گرافن در پتانسیل های شیمیایی متفاوت

هاجر کاویانی باغبادرانی، جمال بروستانی و صمد روشن انتظار

تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده فیزیک

چکیده – در این مطالعه یک حسگر بلور فوتونی با نانولایه‌های گرافن تحت پیکر بندی منشور ارائه کرده‌ایم. ساختار باند، حالتهای سطح، طیف بازتاب و حساسیت حسگر در پتانسیلهای شیمیایی مختلف با استفاده از روش ماتریس انتقال محاسبه می‌شوند. محاسبات نشان می‌دهد با افزایش پتانسیل شیمیایی پهنای شکاف نواری صفر افزایش می‌یابد و حالتهای سطحی به سمت فرکانسهای بالاتر جابجا می-شوند. همچنین بررسی ها افزایش قابل ملاحظه معیار شایستگی حسگر پیشنهاد شده برای حالت های سطحی گاف براگ در پتانسیل شیمیایی $\mu_c = 0.2eV$ و حالت سطحی نوار ممنوعه صفر در $\mu_c = 0.4eV$ را در مقایسه با دیگر پتانسیل های شیمیایی ارائه شده نشان می‌دهد.

کلید واژه- بلور فوتونی، حسگر ، حالتهای سطحی، ماتریس انتقال.

The performance of photonic crystal sensor with grapheme nano-layer in different chemical potentials

H. Kaviani Baghbadorani, J. Barvestani, and S. Roshan Entezar

Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract-In this paper, we have presented a photonic crystal sensor including nano-grapheme layers under the Kretschmann configuration. The band structures, surface modes, reflectivity and sensitivity of photonic crystal sensor in different chemical potentials are calculated by transfer matrix method. Our results show that with increasing the chemical potential, the width of zero-gap in the band structure of photonic crystal expands and surface modes shift to higher frequencies in both conventional band gap and zero-gap. Our investigations illustrate that the figure of merits of the proposed biosensor for the surface mode of zero-gap in $\mu_c = 0.2eV$ and for that of Bragg gap in $\mu_c = 0.4eV$ are considerably higher compared to the figure of merits in other chemical potentials presented in our study.

Keywords: Photonic crystal, sensor, Surface modes, transfer matrix.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

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

مقدمه

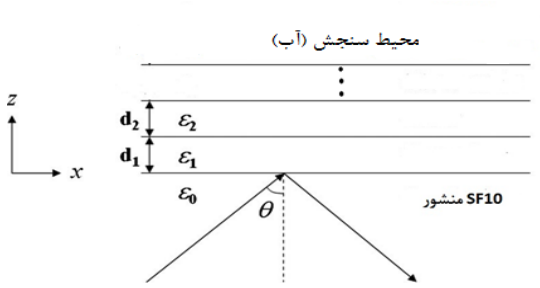
در زمینه توسعه ادوات مبتنی بر بلورهای فوتونی، حسگرهای بلور فوتونی از موثرترین تکنیکهای سنجش محسوب می‌شوند. حسگرها ابزارهای تحلیلی و آشکارساز قدرتمندی هستند و به عنوان یک مبدل عمل می‌کند که می‌تواند تغییرات سطح از قبیل تغییرات در جرم، حجم، قطبش، گذردهی دی‌الکتریکی را به سیگنال مناسبی که توسط جریان یا ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود، تبدیل کند. در این حسگرها مد سطح که در فصل مشترک یک بلور فوتونی بریده شده با محیط خارجی تشکیل می‌شود (حالت سطحی بلاخ)، با نور فرودی تحت پیکربندی منشور(Kretschmann) تزویج می‌شود. این حالتها در داخل یا لبه نوارهای ممنوعه در طیف پاشندگی ساختار قرار می‌گیرند. بر انگیختگی مد سطحی توسط یک دره در طیف بازتاب قابل درک است. موقعیت این دره به تغییرات ضریب شکست محیط خارجی وابسته است. همچنین پهنا و عمق این دره با تغییر در ویژگیهای فیزیکی و ساختاری بلور فوتونی قابل تغییر است و در بررسی عملکرد حسگرها نقش اساسی ایفا می‌کنند[۱-۲].

اخیرا گرافن جهت بهبود حساسیت انواع مختلف حسگرهای زیستی ظهور کرده‌اند و دو ویژگی آن را از مواد پلاسمونیکی متداول نظیر طلا و نقره متمایز کرده-است: الف) گرافن به شدت و بطور پایدار قادر به جذب سطحی مولکولهای زیستی با ساختارهای حلقوی کربن است. در نتیجه گرافن می‌تواند به عنوان یک عنصر شناساگر مولکولهای زیستی جهت افزایش کارآیی جذب سطحی استفاده شود. ب) خواص نوری گرافن منجر به افزایش حساسیت به خاطر تغییر ضریب شکست می-شود[۱-۲]. تک لایه گرافن یک نیمه هادی بدون گاف است که خواص ترابردی و هدایت نوری آن σ_g می‌تواند با دستکاری غلظت حاملها و پیکربندی لایه ها تغییر کند. [۲-۴].

در این مقاله کارآیی یک حسگر زیستی بلور فوتونی با نانولایه های گرافن تحت پیکربندی منشور در پتانسیلهای شیمیایی مختلف بررسی می‌شود. نور فرودی تحت قطبش TM است.

مدل تئوری

شکل(۱) یک طرح پیشنهادی از ساختار حسگر بلور فوتونی تحت پیکربندی منشور را نشان می‌دهد. در این ساختار لایه های دی الکتریک به ترتیب با ضرایب دی الکتریک ε_1 و ε_2 و ضخامت های d_1 و d_2 بصورت متناوب قرار گرفته اند. علاوه بر این، تک لایه های گرافن بین لایه های دی‌الکتریک مجاور محدود شده‌اند.



شکل ۱: طرح شماتیک از حسگر بلور فوتونی

رسانایی نوری گرافن برای فرکانس ω ودمای T بصورت زیر خواهد بود[۳-۴]:

$$\sigma_g(\omega)=\sigma_g^{inter}(\omega)+\sigma_g^{intra}(\omega)$$

$$\sigma_g^{intra}(\omega)=\frac{e^2}{4\hbar}\frac{i}{2\pi}\times \left\{\frac{16k_BT}{\hbar\omega}\ln\left(\cosh\left(\frac{\mu_c}{2k_BT}\right)\right)\right\},$$

$$\sigma_g^{inter}(\omega)=\frac{e^2}{4\hbar}\left\{\frac{1}{2}+\frac{1}{\pi}\arctan\left(\frac{\hbar\omega-2\mu_c}{2k_BT}\right)-\frac{i}{2\pi}\ln\left(\frac{(\hbar\omega+2\mu_c)^2}{(\hbar\omega-2\mu_c)^2+(2k_BT)^2}\right)\right\} \quad (1)$$

که در آن e بار الکترون، $\hbar=\frac{h}{2\pi}$ ثابت پلانک کاهیده، k_B ثابت بولتزمن و μ_c پتانسیل شیمیایی است. گرافن خالص در هر دمایی صفر است. با کمک ولتاژ گیت می‌توان چگالی و نوع حاملی را که μ_c را تغییر می‌دهد، کنترل‌کرد. بدلیل حضور تک لایه های گرافن، جریان سطحی در مرز بین لایه های دی‌الکتریک بوجود خواهد آمد که در قطبش TM بصورت $J_x=\sigma E_x$ است. شرایط مرزی در فصل مشترک لایه ها از معادلات ماکسول تبعیت می‌کنند[۵]:

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

$$\hat{n}\times\left(H_2-H_1\right)=J=\sigma_g\left(\omega\right)E$$
$$\hat{n}\times\left(E_2-E_1\right)=0 \qquad (۲)$$

میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در قطبش TM بصورت زیر تعریف می‌شوند

$$\begin{cases} H_{yj}\left(x,z,t\right)=H_{yj}\left(z\right)e^{i\left(k\beta x-\omega t\right)} \\ E_{xj}\left(x,z,t\right)=E_{xj}\left(z\right)e^{i\left(k\beta x-\omega t\right)} \\ E_{zj}\left(x,z,t\right)=E_{zj}\left(z\right)e^{i\left(k\beta x-\omega t\right)} \end{cases}, \qquad (۳)$$

که $k=\frac{\omega}{c}$ عدد موج، $\beta=n_0\sin\theta_0$ عدد موج در راستای فصل مشترک هستند. E(z) و H(z) دامنه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی هستند و بطور کلی بصورت $\left(a_j e^{ikq_j z}+b_j e^{-ikq_j z}\right)$ تعریف می‌شوند که $q_j=\sqrt{\varepsilon_j\mu_j-\beta^2}\;;(j=a,b)$ و برای محیط خارجی $q_w=-iq_j$. با استفاده از روابط مشهور ماتریس انتقال می‌توان ضرایب در هر لایه، پاشندگی، ضرایب عبور و بازتاب را محاسبه کرد. همچنین حالت های سطحی بلوخ ساختار که در فصل مشترک بین بلور فوتونی منقطع و محیط خارجی تشکیل می‌شوند و در منطقه ممنوعه فرکانسی (نوار گاف فوتونی) منحنی پاشندگی ساختار قرار می‌گیرند نیز با استفاده از روابط ماتریس انتقال به آسانی قابل محاسبه هستند. شرح کاملی از محاسبات در مقاله [۵-۶] آورده شده است.

محاسبه میزان شایستگی حسگرها از ویژگیهای مهم در حوزه سنجش است و توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

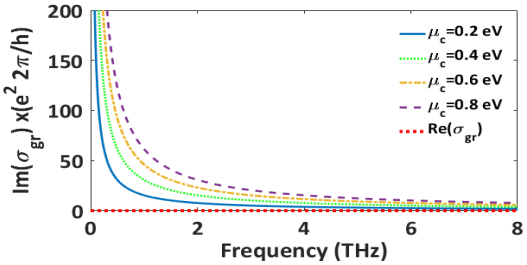
$$FOM=\frac{S_\theta=\frac{\Delta\theta_{res}}{\Delta n_s}}{FWHM}\left(1-\mathrm{MRR}\right), \qquad (۴)$$

که MMR حداقل بازتاب در زاویه تشدید، FWHM پهنای دره تشدید در نصف مینیمم و S_θ شیب تغییرات زاویه تشدید به ازای تغییرات ضریب شکست محیط سنجش است [۷].

نتایج و بحث

بلور فوتونی ارائه شده در این مقاله مطابق شکل ۱ است. در این ساختار $n_1=2.22+i\gamma$ و $n_2=1.46$ به ترتیب ضرایب شکست TiO_2 و SiO_2 هستند[۸]. قسمت موهومی ضریب شکست اتلاف در لایه را بیان می‌کند. همچنین ابعاد ساختار برابر است با: $d_1=d_2=10\,\mu m$.

در این ساختار کلیه مواد استفاده شده غیرمغناطیسی فرض می‌شوند بنابراین $\mu_1=\mu_2=1$. شکل ۲ تغییرات ضریب هدایت نوری را نسبت به تغییرات فرکانس برای چهار پتانسیل شیمیایی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمودار تغییرات ضریب هدایت نوری نسبت به فرکانس برای پتانسیل های شیمیایی مختلف.

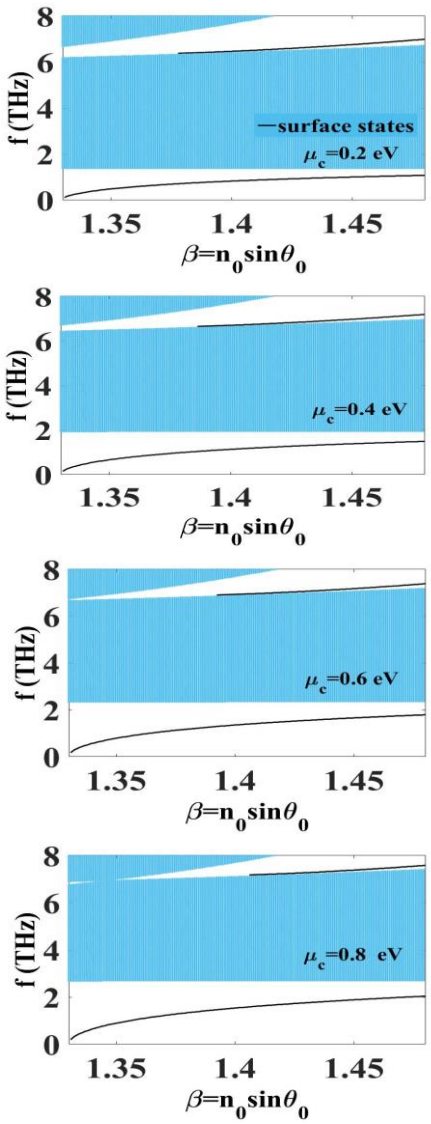
در حالیکه قسمت حقیقی $\sigma_g(\omega)$ تقریبا صفر است، قسمت موهومی ضریب هدایت نوری گرافن سهم مهمی در اندرکنشهای نور- ماده دارد بطوریکه اگر $\mathrm{Im}(\sigma_g)>0$ سیستم امواج با قطبش TM و در غیر اینصورت امواج با قطبش TE را حمایت می‌کند. بعلاوه از نمودار واضح است که شیب تغییرات $\sigma_g(\omega)$ نسبت به افزایش پتانسیل شیمیایی به تدریج کاهش می‌یابد. اثر این تغییرات در نمودار ساختار باند بلور فوتونی و پاشندگی مدهای سطح بوضوح (شکل ۳) مشاهده می‌شود. در شکل۳ ساختار باند بلور فوتونی پیشنهاد شده برای چهار پتانسیل شیمیایی رسم شده است. نواحی ممنوعه، شبه نوارهای گاف فوتونی نامیده می‌شوند. همچنین به دلیل حضور لایه های گرافن، شکاف نواری صفر در ساختار باند مشاهده می‌شود. حالتهای سطحی ساختار که در فصل مشترک بلور فوتونی و محیط سنجش تشکیل می‌شوند نیز در شکافهای نواری ظاهر می‌شوند. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش پتانسیل شیمیایی پهنای نوار ممنوعه صفر افزایش می‌یابد. همچنین حالتهای سطحی شکاف نواری صفر به سمت فرکانسهای بالاتر جابجا می‌شوند. در شکاف نواری بلوخ نیز رفتار مشابهی مشاهده می‌شود. در شکل ۴ طیف بازتاب برای مدهای سطحی در $\beta=1.417$ و با پتانسیلهای شیمیایی مختلف متناظر با شکل۳ رسم شده است. محاسبات نشان می‌دهد با افزایش پتانسیل شیمیایی زوایای تشدید به سمت زوایای کوچکتر جابجا می‌شوند.

معیار شایستگی حسگر با استفاده از معادله برای تغییرات ضریب شکست محیط خارجی (آب) از $n_w=1.33$ تا

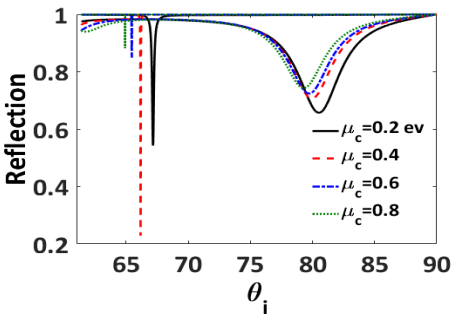
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

$n_w = 1.36$ محاسبه و در جدول۱ آورده شده است. همانگونه که از جدول مشاهده می‌شود مد سطحی در شکاف نواری بلاخ در پتانسیل شیمیایی $\mu_C = 0.2eV$ و مد سطحی درنوار ممنوعه صفر در $\mu_C = 0.4eV$ بهترین عملکرد را از لحاظ سنجش نشان می‌دهند.



شکل ۳: منحنی پاشندگی بلور فوتونی و حالت های سطحی در پتانسیل‌های شیمیایی مختلف.



شکل ۴: نمودار بازتاب بر حسب زاویه فرود برای حالتهای سطحی با $\beta = 1.417$.

μ_C (eV)	f_0 (THz)	FoM_{f_0}	f_1 (THz)	FoM_{f_1}
0.2	0.897	0.327	6.557	0.0031
0.4	1.234	4.492	6.782	0.0026
0.6	1.475	2.485	7.006	0.0026
0.8	1.667	0.674	7.214	0.0025

جدول ۱: بررسی عملکرد حسگر زیستی بلور فوتونی.

نتیجه‌گیری

در این مقاله معیار شایستگی، پاشندگی ساختار و حالتهای سطح، طیف بازتاب و حساسیت حسگر زیستی بلور فوتونی با نانولایه‌های گرافن با استفاده از روش ماتریس انتقال و در پتانسیل های شیمیایی مختلف بررسی شدند. محاسبات نشان داد که با افزایش پتانسیل شیمیایی، پهنای گاف صفر افزایش می‌یابد و حالتهای سطح به سمت فرکانسهای بالاتر جابجا می‌شوند. همچنین حالت سطحی در گاف بلاخ در پتانسیل شیمیایی $\mu_C = 0.2eV$ و حالت سطحی درنوار ممنوعه صفر در $\mu_C = 0.4eV$ بهترین عملکرد را از لحاظ سنجش نشان می‌دهند.

مراجع

[1] .Wu, L., H. S. Chu, W. S. Koh, and E. P. Li. "Highly sensitive graphene biosensors based on surface plasmon resonance." Optics express 18, no. 14 (2010): 14395-14400.

[2] K. V. Sreekanth, S.Zeng, K. T. Yong, T. Yu. "Excitation of surface electromagnetic waves in a graphene-based Bragg grating" Scientific reports 2 (2012).

[3] L. A. Falkovsky "Optical properties of graphene." In Journal of Physics: Conference Series, vol. 129, no. 1, p. 012004. IOP Publishing, 2008.

[4] .B. Oleg L., R. Y. Kezerashvili. "Graphene-based one-dimensional photonic crystal." Journal of Physics: Condensed Matter 24, no. 1 (2011): 015305.

[5] T. Zhan, X. Shi, Y. Dai, X. Liu, J. Zi. "Transfer matrix method for optics in graphene layers" Journal of Physics: Condensed Matter 25, 21 (2013): 215301.

[6] H. K. Baghbadorani, J. Barvestani, S. Roshan Entezar. "Biosensors based on Bloch surface waves in one-dimensional photonic crystal with graphene nanolayers." *Applied Optics* 56, no. 3 (2017): 462-469.

[7] W. K. Jung, N. H. Kim, K. M. Byun. "Numerical study on an application of subwavelength dielectric gratings for high-sensitivity plasmonic detection" Applied optics 51, 20 (2012): 4722-4729.

[8] A. Madani, S. Roshan Entezar. "Optical properties of one-dimensional photonic crystals containing graphene sheets" Physica B: Condensed Matter 431 (2013): 1-5.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]