







## 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 ۷–0.2e پ و حالت سطحی نوار ممنوعه صفر در ۷–0.4 پرا 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  $\mu_c = 0.2 eV$  and for that of Bragg gap in  $\mu_c = 0.4 eV$  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.

مقدمه

در زمینه توسعه ادوات مبتنی بر بلورهای فوتونی، حسگرهای بلور فوتونی از موثرترین تکنیکهای سنجش محسوب می شوند. حسگرها ابزارهای تحلیلی و آشکارساز قدرتمندی هستند و به عنوان یک مبدل عمل میکند که می تواند تغییرات سطح از قبیل تغییرات در جرم، حجم، قطبش، گذردهی دیالکتریکی را به سیگنال مناسبی که توسط جریان یا ولتاژ اندازه گیری می شود، 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) تزويج مي شود. اين حالتها در داخل یا لبه نوارهای ممنوعه در طیف پاشندگی ساختار قرار می گیرند. بر انگیختگی مد سطحی توسط یک دره در طيف بازتاب قابل درک است. موقعیت این دره به تغییرات ضريب شكست محيط خارجي وابسته است. همچنين 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 می کنند[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 شناساگر مولکولهای زیستی جهت افزایش کارآیی جذب است. مطحی استفاده شود. ب) خواص نوری گرافن منجر به افزایش حساسیت به خاطر تغییر ضریب شکست می-شود[1-7]. تک لایه گرافن یک نیمه هادی بدون گاف است که خواص ترابردی و هدایت نوری آن  $\sigma_8$  میتواند با دستکاری غلظت حاملها و پیکربندی لایه ها تغییر کند.

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 تئورى

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  $E_1$  و  $E_2$  و ضخامت های 1 و  $d_2$  بصورت متناوب قرار گرفته اند. علاوه بر این، تک لایه های گرافن بین لایه های دی الکتریک مجاور محدود شده اند.



شکل ۱: طرح شماتیک از حسگر بلور فوتونی

رسانایی نوری گرافن برای فرکانس  $\omega$  ودمای T بصورت زیر خواهد بود[T-7]:

$$\sigma_{g}(\omega) = \sigma_{g}^{\text{inter}}(\omega) + \sigma_{g}^{\text{intra}}(\omega)$$

$$\sigma_{g}^{\text{int}m}(\omega) = \frac{e^{2}}{4\hbar} \frac{i}{2\pi} \times \left\{ \frac{16k_{B}T}{\hbar\omega} \ln\left(\cosh\left(\frac{\mu_{c}}{2k_{B}T}\right)\right) \right\},$$

$$\sigma_{g}^{\text{inter}}(\omega) = \frac{e^{2}}{4\hbar} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{\hbar\omega - 2\mu_{c}}{2k_{B}T}\right) - \frac{i}{2\pi} \ln\left(\frac{(\hbar\omega + 2\mu_{c})^{2}}{(\hbar\omega - 2\mu_{c})^{2} + (2k_{B}T)^{2}}\right) \right\}$$

$$(1)$$

که در آن e بار الکترون،  $\frac{h}{2\pi} = \frac{h}{2\pi}$  ثابت پلانک کاهیده،  $\mu_c$  مابت بولتزمن و  $\mu_c$  پتانسیل شیمیایی است.  $\mu_c$   $\pi_c$  ثرافن خالص در هر دمایی صفر است. با کمک ولتاژ گیت می توان چگالی و نوع حاملی را که  $\mu_c$  را تغییر می دهد، کنترل کرد. بدلیل حضور تک لایه های گرافن، جریان سطحی در مزر بین لایه های دی الکتریک بوجود خواهد آمد که در قطبش TM بصورت  $\pi E_x = \sigma E_x$  است. شرایط مرزی در فصل مشترک لایه ها از معادلات ماکسول تبعیت می کنند[۵]:

$$\hat{n} \times (H_2 - H_1) = J = \sigma_g(\omega)E$$

$$\hat{n} \times (E_2 - E_1) = 0$$
(Y)
$$\hat{n} = TM_1 + E_2 + E_1 + E_2 + E_2 + E_1 + E_2$$

میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در فطبش IM بصورت زیر تعریف میشوند

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

که  $\frac{\omega}{c}$  عدد موج،  $\beta = n_0 \sin \theta_0$  عدد موج در راستای فصل مشترک هستند. (E(z) و (H(z) د دامنه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی هستند و بطور کلی میدانهای الکتریکی و مغناطیسی هستند و بطور کلی بصورت  $(f_{ij}^{**} + b_{j}e^{-i\phi_{j}})$  تعریف میشوند که بصورت  $(f_{ij} = a, b)$  تعریف میشوند که  $(j = a, b); f_{ij} = \sqrt{\varepsilon_j \mu_j - \beta^2}; (j = a, b)$  محیط خارجی  $(j = a, b); f_{ij} = \sqrt{\varepsilon_j \mu_j - \beta^2}; (j = a, b)$ توان ضرایب در هر لایه، پاشندگی، ضرایب عبور و بازتاب توان ضرایب در هر لایه، پاشندگی، ضرایب عبور و بازتاب را محاسبه کرد. همچنین حالت های سطحی بلوخ ساختار را محاسبه کرد. همچنین حالت های سطحی بلوخ ساختار را محاسبه کرد. همچنین حالت های سطحی بلوخ ساختار را محاسبه کرد. همچنین حالت های سطحی بلوخ ساختار را محاسبه همتوند و در منطقه ممنوعه فرکانسی نیز با استفاده از روابط ماتریس انتقال به آسانی قابل 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:

$$FOM = \frac{S_{\theta} = \frac{\Delta \theta_{ms}}{\Delta n_{s}}}{FWHM} (1 - MRR), \qquad (\texttt{f})$$

که MMR حداقل بازتاب در زاویه تشدید، FWHM پهنای دره تشدید در نصف مینیمم و  $S_{\theta}$  شیب تغییرات زاویه تشدید به ازای تغییرات ضریب شکست محیط سنجش است [۷].

### نتايج و بحث

بلور فوتونی ارائه شده در این مقاله مطابق شکل ۱ است. در این ساختار  $\gamma_1 = 2.22 + i\eta_2$  به ترتیب ضرایب شکست  $_2 TiO_2$  هستند[۸]. قسمت موهومی ضریب شکست اتلاف در لایه را بیان میکند. همچنین ابعاد ساختار برابر است با:  $\mu m$ 

در این ساختار کلیه مواد استفاده شده غیرمغناطیسی فرض میشوند بنابراین $1 = \mu_2 = \mu$ . 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  $\sigma_{s}\left( \omega
ight) _{s}$  تقریبا صفر است، قسمت موهومی ضریب هدایت نوری گرافن سهم مهمی  $\operatorname{Im}(\sigma_{1}) > 0$  در اندر کنشهای نور – ماده دارد بطوریکه اگر سیستم امواج با قطبش TM و در غیر اینصورت امواج با قطبش TE را حمايت مىكند. بعلاوه از نمودار واضح است که شیب تغییرات  $\sigma_{1}(\omega)$  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 می شود. در شکل ۳ ساختار باند بلور فوتونی پیشنهاد شده برای چهار پتانسیل شیمیایی رسم شده است. نواحی ممنوعه، شبه نوارهای گاف فوتونی نامیده می شوند. همچنین به دلیل حضور لایه های گرافن، شکاف نواری صفر در ساختار باند مشاهده می شود. حالتهای سطحی ساختار که در فصل مشترک بلور فوتونی و محیط سنجش تشکیل می شوند نیز در شکافهای نواری ظاهر می شوند. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش پتانسیل شیمیایی پهنای نوار ممنوعه صفر افزایش می-یابد. همچنین حالتهای سطحی شکاف نواری صفر به سمت فرکانسهای بالاتر جابجا می شوند. در شکاف نواری بلوخ نیز رفتار مشابهی مشاهده می شود. در شکل ۴ طیف بازتاب برای مدهای سطحی در  $\beta = 1.417 = \beta$ 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  $m_w = 1.33$  فريب شكست محيط خارجى (آب) از  $n_w = 1.33$  تا

210

 $n_w = 1.36$  محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است. همانگونه که از جدول مشاهده می شود 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 می دهند.



**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 $\beta = 1.417$  .

$\mu_c \ ({ m eV} \ )$	$f_{0}$ (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.

#### نتيجهگيرى

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  $U_c = 0.2eV$  و حالت سطحی درنوار ممنوعه صفر در  $U_c = 0.4eV$  بهترین عملکرد را از لحاظ سنجش نشان می دهند.

#### مراجع

- 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.

618