

حسگر زیستی بلور فوتونی فیبوناچی با نانو لایه های گرافن

هاجر کاویانی باغبادرانی، جمال بروستانی و صمد روشن انتظار

تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده فیزیک

چکیده - در این مقاله حسگر زیستی بلور فوتونی گرافنی با هندسه فیبوناچی و تحت پیکربندی منشور بررسی شده است. ساختار باند سیستم تحت مطالعه، حالت های سطح و طیف انعکاس با استفاده از روش مشهور ماتریس انتقال محاسبه شده اند. نتایج نشان می دهند پاشندگی باند و حالت های سطح شدیداً تحت تاثیر هندسه ساختار هستند. علاوه بر این توزیع فضایی دی الکتریک ها نقش اساسی در عملکرد حسگرها بازی می کند. مقایسه حساسیت فازی در حسگر های پیشنهادی نشان می دهد که در ساختارهای با توالی بالاتر فیبوناچی آشکارسازی تغییرات کوچک در ضریب دی الکتریک سطح بسیار قابل ملاحظه است.

کلید واژه - بلور فوتونی، حسگر زیستی، امواج سطحی بلاخ، سنجش فازی، ماتریس انتقال.

Fibonacci photonic crystal bio-sensors with graphene Nano layers

Hajar Kaviani Baghbadorani, Jamal Barvestani and Samad Roshan Entezar

Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

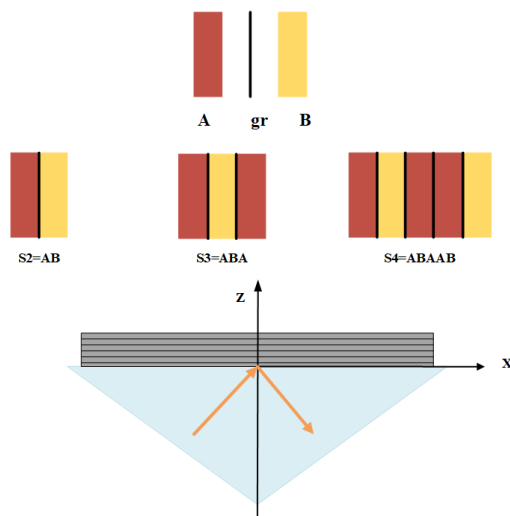
Abstract- In this paper Fibonacci photonic crystal biosensors with graphene Nano-layers under the Kretschmann configuration have been investigated. Band structure, surface modes and reflection spectrum have been calculated by well-known transfer matrix method. Results show that the band structure and the dispersion of the surface modes are deeply affected by the geometry of the proposed structure. In addition, the spatial distribution of the dielectrics plays a basic role in the performance of sensors. The comparison between the maximum amount of phase sensitivity in proposed sensors show that structures with complex Fibonacci sequence are significantly able to detect small differences in the surface refractive index.

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

۱- مقدمه

۲- مدل تئوری

طرح شماتیک از ساختار حسگر بلور فوتونی در شکل ۱ نشان داده شده است. این توالی های پیشنهادی بر اساس رابطه ریاضی $S_{j+1} = \{S_{j-1}, S_j\}, j \geq 1$ طراحی شده اند بطوریکه $S_0 = \{A\}$ و $S_1 = \{B\}$. طول تناوب سلول واحد (d) در توالی های فیبوناچی $d = \alpha d_a + \beta d_b$ است. در این رابطه α تعداد لایه های ماده A و β تعداد لایه های ماده B در توالی فیبوناچی است. در این ساختارها تک لایه گرافن بین دو ماده دی الکتریک محدود شده است [۵۶].



شکل ۱: طرح شماتیک از ساختار پیشنهادی

رسانش نوری گرافن توسط رابطه زیر محاسبه می شود [۴۶]:

(۱)

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

$$\sigma_g^{intra}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar} \frac{i}{2\pi} \times$$

$$\left\{ \frac{16k_B T}{\hbar \omega} \ln \left(\cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right) \right\},$$

$$\sigma_g^{inter}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left(\frac{\hbar \omega - 2\mu_c}{2k_B T} \right) - \right.$$

$$\left. \frac{i}{2\pi} \ln \left(\frac{(\hbar \omega + 2\mu_c)^2}{(\hbar \omega - 2\mu_c)^2 + (2k_B T)^2} \right) \right\}$$

در این رابطه e بار الکترون، $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ثابت پلانک کاهیده، k_B

ثابت بولتزمن و μ_c پتانسیل شیمیایی است. در نتیجه حضور تک لایه های گرافن، جریان سطحی در مزر بین لایه های دی الکتریک بوجود می آید. میدان های الکتریکی و مغناطیسی در فصل مشترکها با

مشخصات نوری که در یک محیط دی الکتریک منتشر می شود می تواند با تغییر مدولاسیون فضایی ثابت دی الکتریک محیط تغییر کند. اگر این تغییرات متناوب باشند، ساختار متناظر بلور فوتونی نامیده می شود. اخیرا ساختارهای با توزیع فضایی تصادفی از ضرایب شکست مواد با ویژگیهای نوری جدید توجهات بسیاری را جلب کرده اند. این ساختارها شبه بلور نامیده می شوند و خواصی بین ساختارهای با نظم کامل و اختلال کامل را دارا هستند [۱]. نوارهای ممنوعه در ساختار باند بلورهای فوتونی بسیاری از خواص بنیادی نور را تغییر می دهند و فرصتهای تحقیقاتی وسیعی را ایجاد می کنند. بررسی ها نشان داده اند که این ساختارها از امواج سطحی بلاخ (BSWs) پشتیبانی میکنند. این امواج در فصل مشترک یک بلور فوتونی قطع شده و یک محیط همگن تشکیل می شوند. امواج سطحی بلاخ در بررسی اندرکنش نور- ماده و حسگری بسیار با ارزش هستند و مطالعات تجربی و تئوری قابلیت این حالتها را در بحث حسگرها اثبات کرده اند [۱-۴].

علاوه بر هندسه ساختار، ویژگیهای نوری سیستم تحت تاثیر مواد استفاده شده در بلور یا شبه بلور فوتونی نیز تغییر می کند. گرافن یک لایه از اتمهای کربن است که در یک شبکه لانه زنبوری مرتب شده است و به خاطر ویژگیهای الکترونی، نوری و مکانیکی استثنایی هدف بسیاری از مطالعات در حوزه ادوات الکترونیک نوری و نانو الکتریک در سالهای شده است. ساختار باند گرافن منحصر بفرد بوده و باندهای هدایت و ظرفیت در نقاط دیراک با هم در تماس هستند. در این نقاط الکترونها به عنوان الکترونهای دیراک نسبیتی بدون جرم توصیف می شوند [۴-۷].

در این مقاله حسگرهای بلور فوتونی گرافنی یک بعدی با توالبیهای هندسی فیبوناچی مطالعه می شود.

شرایط مرزی زیر به هم مرتبط می‌شوند:

$$\begin{aligned} \hat{n} \times (H_2 - H_1) &= J = \sigma_g(\omega) E \\ \hat{n} \times (E_2 - E_1) &= 0 \end{aligned} \quad (۲)$$

با اعمال شرایط مرزی، ضرایب میدانها در لایه اول به ضرایب متناظر در لایه آخر با استفاده از ماتریس انتقال M مرتبط می‌شوند [۷ و ۸]:

$$(۳) \quad \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{N+1} \\ b_{N+1} \end{pmatrix}$$

$$R = |r_{s,p}|^2 = \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2, \quad r_{s,p} = |r_{s,p}| e^{i\phi_{s,p}}$$

$r_{s,p}$ ضریب انعکاس سیستم در قطبشهای s (TE) و p (TM) است و ϕ ضریب فاز است.

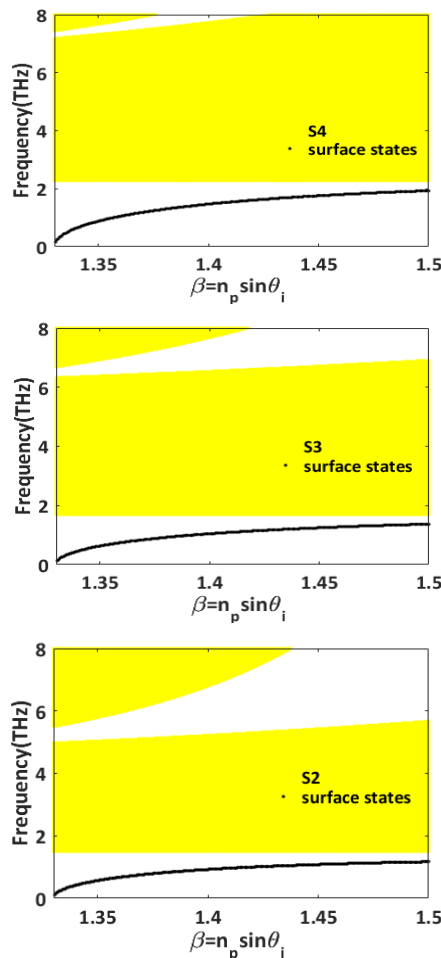
اختلاف فاز $\delta\phi = \phi_s - \phi_p$ است و حساسیت فازی با رابطه زیر تعریف می‌شود [۹ و ۴]:

$$(۴) \quad S_\phi = \frac{d\delta\phi}{dn_s}$$

۳- نتایج و بحث

در این مقاله عملکرد حسگر زیستی بلور فوتونی فیبوناچی در توالیهای مختلف مورد بررسی قرار میگیرد. در ساختار تحت بررسی تک لایه های گرافن بین تمام لایه ها قرار می‌گیرند. لایه ها غیر مغناطیسی فرض می‌شوند. ضریب شکست مواد بکار رفته در ساختارهای پیشنهادی: $n_{prism} = 1.515$, $n_b = 1.46$, $n_a = 2.22$ و ضریب شکست ماده سطح در حالت خالص و بدون آلودگی $n_s = 1.33$ است. ضخامت لایه های A و B بگونه ایست که ضخامت سلول واحد (d) در تمام توالی های مورد مطالعه ثابت فرض شود: $S_4: d_a = d_b = 4 \mu m$ ، $S_2: d_a = d_b = 10 \mu m$ و $S_3: d_a = 5 \mu m, d_b = 10 \mu m$.

در این ساختارها نور فرودی تحت پیکربندی منشور با مد سطحی در زاویه ای بزرگتر از زاویه بحرانی تزویج می‌شود. این زاویه تشدید توسط یک دره عمیق در طیف بازتاب قابل درک است.



شکل ۲: ساختار باند و حالت های سطحی در سه توالی نخست فیبوناچی

برای بررسی دقیقتر این قابلیت، حساسیت فازی حسگرها را در زاویه های تشدید و برای تغییرات ضریب شکست سطح از $1/33$ تا $1/36$ محاسبه می-کنیم (شکل ۴). همانگونه که انتظار می رود هرچه توالی فیبوناچی ساختار بالاتر می رود، حساسیت فازی با شدت بیشتری افزایش می یابد بطوریکه در توالی چهارم، S_4 از مرتبه 10^5 و در توالی دوم از مرتبه 10^4 است.

۴- نتیجه گیری

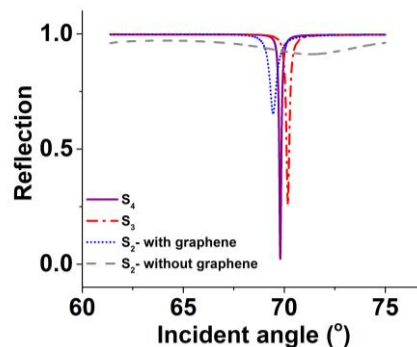
در این مقاله ساختار باند، رابطه پاشندگی حالت های سطح و خواص سنجش ساختارهای بلور فوتونی و شبه بلور فوتونی با یکدیگر مقایسه شده است. بررسی ها نشان داد که ساختار باند شدیداً به هندسه بلور فوتونی وابسته است بگونه ای که پهنای باند ممنوعه صفر در شبه بلورهای فوتونی با افزایش توالی فیبوناچی بیشتر می شود همچنین مشاهده شد که حالت های سطح به سمت انرژی های بالا جابجا می-شوند. مطالعه طیف بازتاب و حساسیت فازی ساختارهای پیشنهادی نشان داد که ساختارهای شبه بلور فوتونی کاندیداهای بهتری برای ساخت حسگرهای زیستی هستند.

مراجع

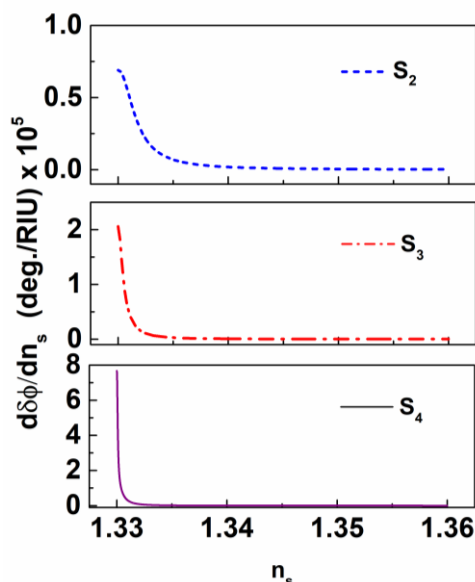
- [1] V. Passias, N. V. Valappil, Z. Shi, L. Deych, A. A. Lisyansky, V. M. Menon. "Luminescence properties of a Fibonacci photonic quasicrystal." *Optics express* 17, no. 8, 6636-6642, 2009.
- [2] M-I Baraton, ed. "Sensors for Environment, Health and Security: Advanced Materials and Technologies". Springer Science & Business Media, 2008.
- [3] M. J. Serpe, Y. Kang, Q. M. Zhang, eds. *Photonic Materials for Sensing, Biosensing and Display Devices*. Springer, 2016.
- [4] H. Kaviani 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, 462-469, 2017.
- [5] P. Zhao, X. Chen. "Electronic band gap and transport in Fibonacci quasi-periodic graphene superlattice." *Applied Physics Letters* 99, no. 18, 182108, 2011.
- [6] Y. Zhang, Zh. Wu, Y. Cao, H. Zhang. "Optical properties of one-dimensional Fibonacci quasi-periodic graphene photonic crystal." *Optics Communications* 338: 168-173, 2015.
- [7] K. V. Sreekanth, S. Zeng, K. T. Yong, T. Yu, "Sensitivity enhanced biosensor using graphene-based one-dimensional photonic crystal", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 182, 424-428, (2013).
- [8] P. Yeh, A. Yariv, and A. Cho, "Optical surface waves in periodic layered media," *Appl. Phys. Lett.* 32, 104-105, 1978
- [9] T. Zhan, X. Shi, Y. Dai, X. Liu, J. Zi. "Transfer matrix method for optics in graphene layers." *Journal of Physics: Condensed Matter* 25, no. 21, 215301, 2013.
- [10] A. Sinibaldi, A. Anopchenko, R. Rizzo, F. Michelotti, N. Danz, P. Munzert, P. Rivolo, S. Ricciardi, and F. Frascella, "Phase-sensitive Bloch surface wave biosensors," in *AISEM Annual Conference, XVIII* (IEEE, 2015)

در شکل ۲ ساختار باند و پاشندگی مدهای سطح در سه توالی اول فیبوناچی نمایش داده شده است. روش محاسبه مدهای سطح بطور کامل در بسیاری از مقالات آمده است [۴۸،۹]. نوار ممنوعه صفر که بخاطر حضور نانو لایه های گرافن ایجاد شده، در همه ساختارها مشاهده می شود و با افزایش توالی فیبوناچی عرض آن افزایش می یابد. بعلاوه مشاهده می شود که حالت های سطح در نوار ممنوعه صفر به سمت انرژی های بالاتر جابجا می شوند. همچنین موقعیت و اندازه نوار ممنوعه براگ در انرژی های بالاتر به شدت به دامنه و هندسه ساختار وابسته می باشد.

در شکل ۳ طیف بازتاب مدهای انتخابی در هریک از توالی های فیبوناچی با $\beta = 1.42$ رسم شده است. از شکل واضح است که دره تشدید در بلور فوتونی با توالی های بالا عمیق تر و باریکتر است. این یک ویژگی مثبت در حسگرهای بلور فوتونی است و قابلیت آشکارسازی با دقت بالا در سطح را افزایش می دهد. در یک مقایسه زاویه تشدید برای توالی S_2 بدون حضور گرافن رسم شده است. همانگونه که مشاهده می شود زاویه تشدید به اندازه کافی عمیق نیست و حسگر دقت آشکارسازی لازم را ندارد.



شکل ۳: نمایش تغییرات طیف بازتاب با زاویه تابش نور فرودی در سه توالی نخست فیبوناچی.



شکل ۴: نمایش حساسیت فازی در تغییرات ضریب شکست محیط سطح در سه توالی نخست فیبوناچی.