حسگرزیستی 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 می‌دهند پاشندگی باند و حالت های سطح شدیدا تحت تاثیر هندسه ساختار هستند. علاوه بر این توزیع فضایی دی‌الکتریک ها نقش اساسی در عملکرد حسگرها بازی می‌کند. مقایسه حساسیت فازی در حسگر های پیشنهادی نشان می‌دهد 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

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

۱- مقدمه

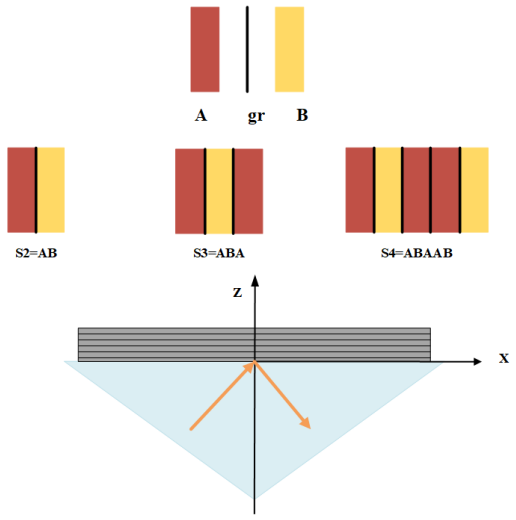
مشخصات نوری که در یک محیط دی‌الکتریک منتشر می‌شود می‌تواند با تغییر مدولاسیون فضایی ثابت دی‌الکتریک محیط تغییر کند. اگر این تغییرات متناوب باشند، ساختار متناظر بلور فوتونی نامیده می‌شود. اخیرا ساختارهای با توزیع فضایی تصادفی از ضرایب شکست مواد با ویژگیهای نوری جدید توجهات بسیاری را جلب کرده اند. این ساختارها شبه بلور نامیده می‌شوند 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 می‌دهند و فرصتهای تحقیقاتی وسیعی را ایجاد می‌کنند. 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 می‌شوند. امواج سطحی بلاخ در بررسی اندرکنش نور- ماده و حسگری بسیار با ارزش هستند و مطالعات تجربی و تئوری قابلیت این حالتهای سطح 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 می‌کند. 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 می‌شوند[۴-۷].

در این مقاله حسگرهای بلور فوتونی گرافنی یک بعدی با توالیهای هندسی فیبوناچی مطالعه می‌شود.

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 شده‌اند 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 تعدادلایه های ماده B در توالی فیبوناچی است. در این ساختارها تک لایه گرافن بین دو ماده دی‌الکتریک محدود شده است[۶و۵].



شکل ۱: طرح شماتیک از ساختار پیشنهادی

رسانش نوری گرافن توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود[۶و۴]:

(۱)

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

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

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

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 مرز بین لایه های دی‌الکتریک بوجود می‌آید. میدان های الکتریکی و مغناطیسی در فصل مشترکها با

---

[۱] Bloch Surface Waves

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

شرایط مرزی زیر به هم مرتبط می‌شوند:

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

با اعمال شرایط مرزی، ضرایب میدانها در لایه اول به ضرایب متناظر در لایه آخر با استفاده از ماتریس انتقال M مرتبط می‌شوند[۸و۷]:

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

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

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

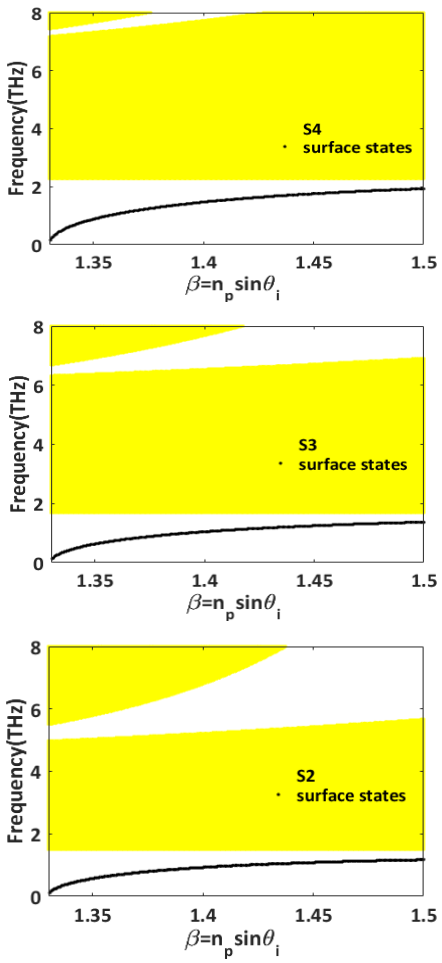
اختلاف فاز $\delta\phi=\phi_s-\phi_p$ است و حساسیت فازی با رابطه زیر تعریف می‌شود[۹و۴]:

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

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: $n_a=2.22$، $n_b=1.46$، $n_{prism}=1.515$ 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: $S_4:d_a=d_b=4\mu m$، $S_3:d_a=5\mu m, d_b=10\mu m$ و $S_2:d_a=d_b=10\mu m$.

در این ساختارها نور فرودی تحت پیکربندی منشور[۲] 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

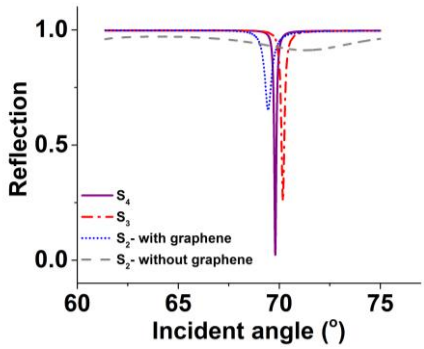
[۲] Kretschmann

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

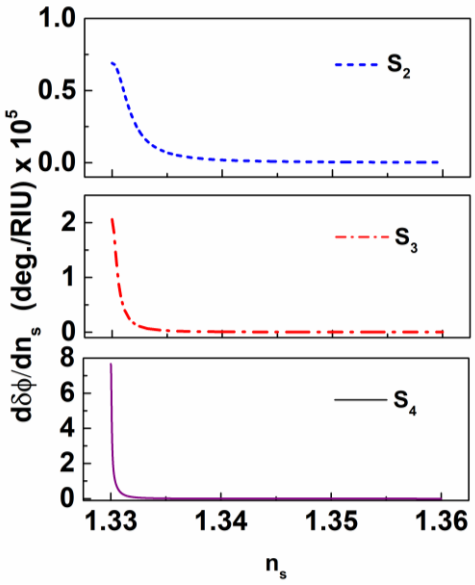
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

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[۹و۸و۴]. نوار ممنوعه صفر که بخاطر حضور نانو لایه های گرافن ایجاد شده، در همه ساختارها مشاهده می‌شود و با افزایش توالی فیبوناچی عرض آن افزایش می‌یابد. بعلاوه مشاهده می‌شود که حالتهای سطح در نوار ممنوعه صفر به سمت انرژی های بالاتر جابجا می‌شوند. همچنین موقعیت و اندازه نوار ممنوعه براگ در انرژی های بالاتر به شدت به دامنه و هندسه ساختار وابسته می‌باشد.

در شکل ۳ طیف بازتاب مدهای انتخابی در هریک از توالیهای 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 می‌دهد. در یک مقایسه زاویه تشدید برای توالی S_2 بدون حضور گرافن رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود 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 با تغییرات ضریب شکست محیط سطح 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 ۱/۳۳ تا ۱/۳۶ محاسبه می-کنیم (شکل ۴). همانگونه که انتظار می‌رود هرچه توالی فیبوناچی ساختار بالاتر می‌رود، حساسیت فازی با شدت بیشتری افزایش می‌یابد بطوریکه درتوالی چهارم ، S_ϕ از مرتبه 10^5 و در توالی دوم از مرتبه 10^4 است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار باند، رابطه پاشندگی حالتهای سطح و خواص سنجش ساختارهای بلور فوتونی و شبه بلور فوتونی با یکدیگر مقایسه شده است. بررسی ها نشان داد که ساختار باند شدیدا به هندسه بلور فوتونی وابسته است بگونه ای که پهنای باند ممنوعه صفر در شبه بلورهای فوتونی با افزایش توالی فیبوناچی بیشتر می‌شود همچنین مشاهده شد که حالتهای سطح به سمت انرژی‌های بالا جابجا می-شوند. مطالعه طیف بازتاب و حساسیت فازی ساختارهای پیشنهادی نشان دادکه 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 Communications338: 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)

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]