بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# بازتابندگی تمام سویه امواج الکترومغناطیس در شبه بلورهای فوتونی شامل صفحات گرافن

عبدالرحمن نامدار[۱]، زهره داورپناه[۱]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

**چکیده: در این مقاله بازتابندگی امواج الکترومغناطیسی در شبه بلورهای یک بعدی فیبوناچی، تیو-مورس، دو-دوره‌ای شامل گرافن را با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی می کنیم. نشان می دهیم که با حضور لایه های گرافن در ساختارهای شبه بلور، برای هر دو مد قطبش *TE* و *TM*، یک گاف باند فوتونی تمام سویه علاوه بر گاف باند فوتونی براگ برای هر سه ساختار در نظر گرفته شده القا می شود. بعلاوه، نشان می‌دهیم که پهنای گاف باندهای براگ در همه ساختارها در امواج *TE* (امواج *TM*) با افزایش زاویه تابش افزایش(کاهش) یافته و در هر دو موج *TE* و *TM* به سمت فرکانس های بالا جابجا می شوند و نیز گاف باندهای تمام سویه براگ در هر سه ساختار شبه تناوبی بر خلاف امواج *TE* برای امواج *TM* تشکیل نمی شوند.**

کلید واژه- شبه بلورهای فوتونی، گاف باند تمام سویه، گرافن

# Omnidirectional reflection of electromagnetic wave on quesi-periodic photonic crystals containing graphene sheets

Abdolrahman Namdar[1], Zohreh Davarpanah[1]
Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz,Iran

Abstract: In this paper we study the reflection of electromagnetic waves in Fibonacci, Thue-Morse, double-period quasi-periodic one-dimensional photonic crystals containing grapheme sheets, using transfer matrix method. we show that in the presence of graphene sheets in the quasi-periodic structures, there is an omnidirectional graphene induced photonic band gap in addition to Bragg photonic gap for both TE and TM polarization modes in the all three considered structures. Also, we show that Bragg band gap width increases (decreases) with angle of incidence for TE (TM) waves, for all structures and it shifts to higher frequencies for both waves. As well as, Bragg omnidirectional photonic band gaps in the all three quasi-periodic structures, unlike the TE waves, do not form for TM waves.

Key words: quasi periodic photonic crystal, omnidirectional photonic band gap, graphene

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر توجه زیادی به بلورهای فوتونی شده است. این ساختارها، انتشار فوتون در بازه‌ی مشخصی از انرژی را ممنوع می‌کنند که این بازه به گاف باند فوتونی مشهور است[۱]. مهندسی گاف باند فوتونی کاربردهای بالقوه‌ای را در اپتوالکترونیک فراهم می‌کند[۵-۲]. برای مدتی طولانی تصور می‌شد که رسیدن به گاف باند فوتونی یکسان برای قطبش‌ها و زوایای فرودی متفاوت در بلورهای فوتونی یک بعدی غیرممکن است. خوشبختانه در سال ۱۹۹۸، ینک[۱] اثبات کرد که یک ساختار دی‌الکتریک متناوب یک بعدی تحت شرایط مناسب می‌تواند نور را در هر زاویه‌ی تابشی و هر قطبشی بازتاب کند و گاف باند همه سویه را تشکیل دهد و این کار در نهایت منجر به ساخت به آینه‌های دی‌الکتریک همه‌سویه بر اساس چند لایه‌ای‌های دی‌الکتریک یک بعدی شد[۶و۷].

گرافن نوع دو بعدی گرافیت و شامل لایه‌های مسطح اتم‌های کربن در یک شبکه‌ی شش گوشی است. گرافن بخاطر خواص منحصربه‌فرد خود، از جمله تحرک بالای حامل‌های بار، طیف انرژی الکترونی بدون گاف بین باند رسانش و باند ظرفیت در بسیاری از مطالعات نظری و تجربی مورد توجه قرار گرفته است. در بازه‌ی فرکانسی تراهرتز و مادون قرمز دور، گرافن مقدار کمی رسانندگی اپتیکی دارد که منجر به جذب کم گرافن می‌شود. بنابراین یک بلور فوتونی دی‌الکتریک – گرافن که در آن صفحات گرافن بین لایه‌های دی‌الکتریک مجاور هم قرار داده شده توجه محققان را به خود جلب کرده است،همانطور که ذکر شد گرافن جذب کمی در بازه فرکانسی تراهرتز و مادون قرمز در مقایسه با دیگر فلزات دارد،همچنین خواص اپتیکی و الکتریکی منحصر گرافن منجربه علاقه‌مندی به مطالعه ساختارهای پریودیک و شبه پریودیک شامل گرافن شده است.

شبه بلورهای فوتونی به ساختارهای دی‌الکتریکی گفته می شود که ضرایب شکست آنها به صورت غیرتناوبی کنار یکدیگر قرار گرفته باشد، این سیستم به عنوان حالتی بین ساختار تناوبی و ساختار نامنظم درنظر گرفته می‌شود. از جمله‌ی این ساختارها می‌توان به ساختارهای شبه‌متناوب دودوره‌ای، تیو-مورس و فیبوناچی اشاره کرد. این ساختارها به شکل زیر تعریف می‌شوند:

ساختارهای دودوره‌ای: این ساختارها از دو لایه A, B تشکیل یافته‌اند که با رابطه جاینشینی به صورت زیر حاصل می شوند:

$$A \to AB$$

$$B \to AA$$

ساختارهای تیو-مورس: ساختارهای تولید شده براساس این دنباله با تکرار جاینشینی زیر بدست می‌آیند:

$$A \to AB$$

$$B \to BA$$

ساختارهای فیبوناچی: رابطه‌ی کلی ساختار فیبوناچی بصورت زیر است:

$$S(i) = S(i-2)S(i-1), i \geq 2$$

$$S(0) = \{B\}, S(1) = \{A\}$$

اف کیئو[۲] و همکارانش در سال ۲۰۰۴ بازتاب امواج الکترومغناطیسی‌را از ساختارهای چندلایه‌ای دی‌الکتریکی تیو-مورس خودمتشابه که دارای گاف باند فوتونی تمام‌سویه بودند، گزارش دادند و به صورت نظری به این نتیجه رسیدند که تعداد و پهنای گاف باند فوتونی تمام‌سویه به نسبت ضرایب شکست لایه‌ها و ضخامت دی‌الکتریکی لایه‌ها بستگی دارد [8].

ما در این مقاله گاف‌باندهای فوتونی شبه‌بلورهای چیده شده براساس سری‌های تیو-مورس، فیبوناچی و دو-دوره ای را بررسی می‌کنیم و تفاوت آن با کارهای قبلی این است که ما صفحات گرافن را بین لایه‌های دی‌الکتریک شبه بلورها جایگذاری می‌کنیم.

## ۲- فرمول بندی:

در ساختارهای فرض شده، صفحات گرافن بین لایه های دی الکتریک جایگذاری شده، رسانندگی اپتیکی صفحات گرافن برای فرکانس ω، در دمای T بصورت زیر انتخاب شده است:

[۱] Yink

[۲] F.QIU



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]

$$\sigma_g(\omega)=\sigma_g^{intra}(\omega)+\sigma_g^{inter}(\omega) \quad (۱)$$

$$\sigma_g^{intra}(\omega)=-j\frac{e^2k_BT}{\pi\hbar^2(\omega-j\Gamma)}\left[\frac{\mu_c}{k_BT}+2\ln(e^{-\mu_c/k_BT}+1)\right] \quad (۲)$$

$$\sigma_g^{inter}(\omega)=\frac{-je^2}{4\pi\hbar}\ln\left(\frac{2|\mu_c|-(\omega-j\Gamma)\hbar}{2|\mu_c|+(\omega-j\Gamma)\hbar}\right) \quad (۳)$$

در این مقاله با استفاده از روش ماتریس انتقال و با استفاده از نرم افزار متلب [9] ساختار باند فوتونی و بازتابندگی ساختارها را بررسی خواهیم کرد.

با استفاده از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، شرایط مرزی و ماتریس انتشار نور در محیط همگن، ماتریس انتقال لایه های دی‌الکتریک-صفحات گرافن به صورت زیر بیان می‌شود. برای امواج TE :

(۴)

$$M_j(d_j,\omega)=\begin{pmatrix}\cos(k_{zj}d_j) & (i/q_j)\sin(k_{zj}d_j)\\ \sigma_g\cos(k_{zj}d_j)+iq_j\sin(k_{zj}d_j) & (i\sigma_j/q_j)\sin(k_{zj}d_j)+\cos(k_{zj}d_j)\end{pmatrix}$$

و برای امواج TM :

(۵)

$$M_j(d_j,\omega)=\begin{pmatrix}\cos(k_{zj}d_j)-(i\sigma_j/q_j)\sin(k_{zj}d_j) & (i/q_j)\sin(k_{zj}d_j)-\sigma_j\cos(k_{zj}d_j)\\ iq_j\sin(k_{zj}d_j) & \cos(k_{zj}d_j)\end{pmatrix}$$

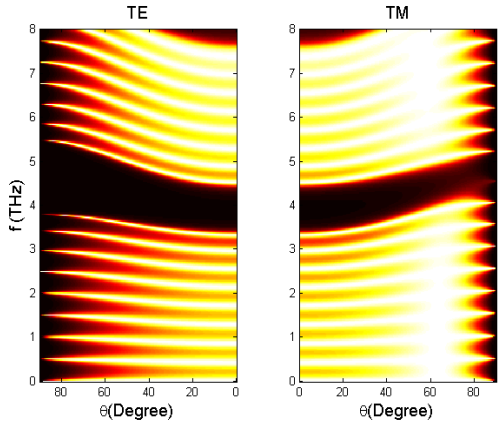
$q_j=(k_{zj}/\omega\varepsilon\varepsilon_0)$ و $q_j=(k_{zj}/\omega\mu\mu_0)$ به ترتیب برای مد TM و TE می‌باشد، $q_0$ و $q_t$ برابر همان پارامتر $q$ محیط ورود و خروج است . ماتریس انتقال کل ساختارهای مختلف به صورت $T[S(n)]=\Pi_{i=1}^{N}M_i$ بیان می‌شود.

## ۳- بحث و نتیجه گیری:

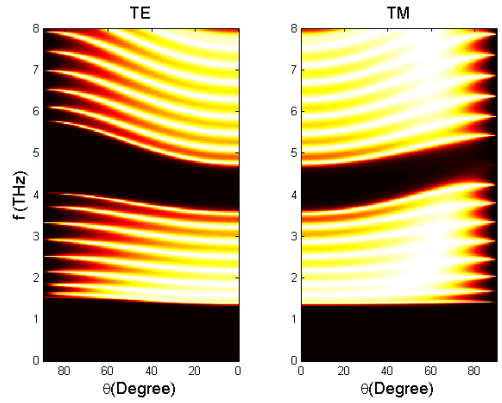
در محاسبات عددی ما از پارامترهای اپتیکی و هندسی زیر استفاده می کنیم:

$$d_A=d_B=10\mu m,\quad \varepsilon_A=5,\varepsilon_B=2.5,\quad \mu_C=0.2eV,\ \Gamma=0,\ T=300K \quad (۶)$$

که در آن $d_A$ و $d_B$ به ترتیب ضخامت لایه‌های A و B، $\varepsilon_A$ و $\varepsilon_B$ به ترتیب تراوایی الکتریکی لایه A و B و $\mu_C$ پتانسیل شیمیایی صفحات گرافن می‌باشد که توسط ولتاژ ورودی قابل کنترل است، $\Gamma$ نرخ پراکندگی پدیده شناختی و T دما محیط است. ابتدا محاسبات گاف باند ناشی از بلور متناوب مرتبه ۳ در غیاب صفحات گرافن و سپس در حضور گرافن را در شکل ۱ نشان می‌دهیم تا تاثیر حضور گرافن در ساختار ببینیم و همچنین تعداد گاف باندها در ساختار متناوب معلوم شود.




شکل۱-الف)گاف باند بلور فوتونی مرتبه ۳ در غیاب صفحات گرافن برای امواج TEو TM




شکل۱-ب) گاف باند بلور فوتونی مرتبه ۳ شامل صفحات گرافن برای امواج TEو TM

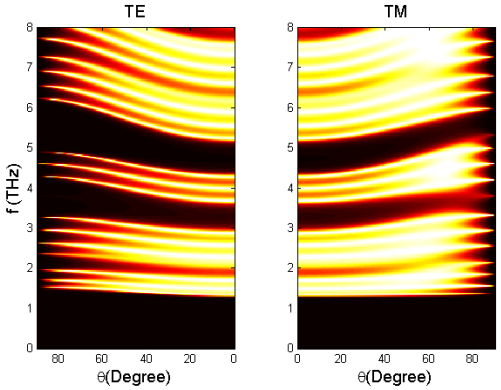
از مقایسه‌ی شکل‌های(۱-الف) و(۱-ب) می‌بینیم در ساختار بدون گرافن فقط یک گاف باند وجود دارد که مشهور به گاف باند براگ است و ساختار در حضور گرافن در فرکانس‌های پایین دارای یک گاف باند تمام‌سویه‌ی اضافی است که بخاطر وجود صفحات گرافن می باشد و آن را گاف باند فوتونی القا شده گرافن می نامیم. همچنین ملاحظه می شود که هر دو گاف باند فوتونی براگ و القایی در مورد هر دو قطبش TE و TM تمام‌سویه هستند.



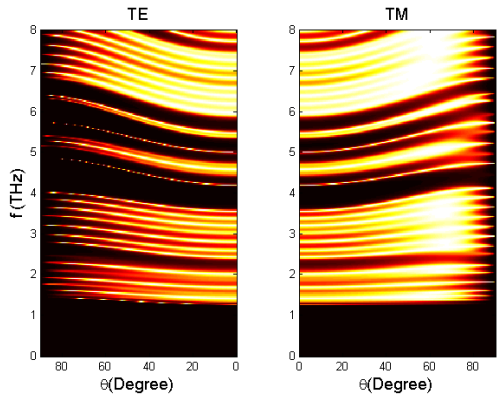
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]

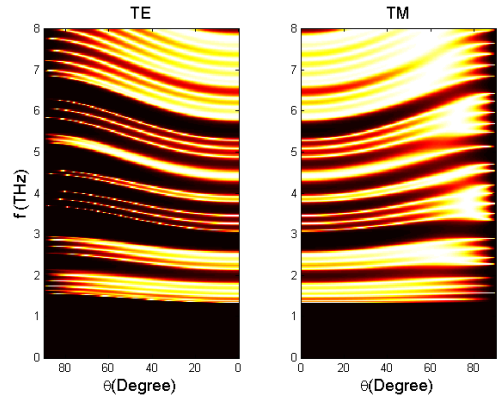
نمودارهای ساختار گاف باندی شبه بلورهای فوتونی یک بعدی فیبوناچی مرتبه ۵ ، دو-دوره ای مرتبه۲ و تیومورس مرتبه ۲ شامل صفحات گرافن بصورت تابعی از $\theta$ برای امواج TE و امواج TM به ترتیب در شکلهای ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.




شکل ۲: گاف باند فوتونی شبه بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی مرتبه ۵ شامل صفحات گرافن بصورت تابعی از $\theta$ برای امواج TE و امواج TM




شکل ۳: گاف باند فوتونی شبه بلور فوتونی دو-دوره ای یک بعدی مرتبه ۲ شامل صفحات گرافن بصورت تابعی از $\theta$ برای امواج TE و امواج TM




شکل ۴: گاف باند فوتونی شبه بلور فوتونی تیومورس یک بعدی مرتبه ۲ شامل صفحات گرافن بصورت تابعی از $\theta$ برای امواج TE و امواج TM

اولا از مقایسه نمودار شکل(۱-ب) و شکل ۲ ملاحظه می شود که تعداد گاف باندهای براگ با افزایش مرتبه افزایش می یابد. بعلاوه شکلهای ۲ تا ۴ نشان می دهند که پهنای گاف باند در مد TE با افزایش زاویه تابش افزایش یافته و نیز به سمت فرکانس های بالا جابجا می شوند در حالی که در مد TM پهنای گاف باند با افزایش زاویه تابش کاهش یافته و با آهنگ نسبتا سریعتری به سمت فرکانس های بالا جابجا می شوند.

نتایج محاسبات عددی مبتنی بر روش ماتریس انتقال در خصوص گاف باندی شبه بلور های فوتونی یک بعدی فیبوناچی مرتبه ۵ (شکل۲)، دو-دوره ای مرتبه۲(شکل۳) و تیومورس مرتبه ۲ (شکل۳) شامل صفحات گرافن بصورت تابعی از زاویه تابش برای امواج TE و امواج TM نشان می دهند که برای امواج TM گاف باندهای تمام سویه براگ در هر ساختار شبه تناوبی تقریبا تشکیل نمی شود وفقط در امواج TE می توان گاف باند تمام سویه براگ با پهنای کم مشاهده نمود. به دلیل اینکه نسبت ضریب شکست دو لایه دی‌الکتریک در ساختار مورد نظر $r = \frac{n_B}{n_A} = \sqrt{2}$ است و همانطور که در مقدمه هم ذکر شد هر چه r بزرگ‌تر باشد احتمال وجود گاف‌باند تمام سویه بیشتر است.

## مراجع


[1] Yablonovitch E., Phys. Rev. Lett., 58 (1987) 2059; John S., Phys. Rev. Lett., 58 (1987) 2486M.

[2] JoannopoulosJ. D., Meade R. D. and Winn J. N., Photonic Crystals (Princeton University Press, Princeton) 1995.

[3] Yang X. B., Liu Y. Y. and Fu X. J., Phys. Rev. B, 59 (1999) 4545.

[4] Macia E., Appl. Phys. Lett., 73 (1998) 3330; Phys. Rev. B, 63 (2001) 205421.

[5] Peng R. W., Liu Y. M., Huang X. Q., Qiu F., Wang Mu, Hu A., Jiang S. S., Feng D., Ouyang L. Z. and Zou J., Phys. Rev. B, 69 (2004) 165109.

[6] Fink Y., Winn J. N., Fan S., Chen C., Michel J., JoannopoulosJ. D. and ThomasE. L., Science, 282 (1998) 1678.

[7] Lee H. Y. and Yao T., J. Appl. Phys., 93 (2003) 819.

[8] F. Qiu, R.W. Peng, X. Q. Huang, X. F. Hu, Mu. Wang, A.Hu, S. S. Jiang and D. Feng, *Europhys*. Lett. 68(5),(2004) 658-663,.

[9] A. Madani, S. Roshan Entezar, Phys. B Condens. Matter 431 (2013) 1–5.




این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]