

## ویژگی مدهای نقص در بلور فوتونی یک بعدی گرافن پایه

زیبا سالکی<sup>۱</sup>، امیر مدنی<sup>۲</sup> و صمد روشن انتظار<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup>گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

چکیده - در این مقاله خواص تراگسیل ساختار پریودیک دی الکتریک- گرافن یک بعدی حاوی نقص با استفاده از روش ماتریس انتقال مورد مطالعه قرار گرفته است. ساختار مورد نظر متشکل از نانولایه‌های یکسان گرافن است که به صورت پریودیک توسط لایه‌های یکسان دی الکتریک از هم جدا شده‌اند و لایه‌ی نقص در مرکز ساختار قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشانگر وجود گاف باند القایی گرافن در فرکانس‌های پایین تراهرتزی باشد. هم چنین یک مده نقص در گاف باند مربوطه قابل مشاهده است که ناشی از شکست تناوب شبکه گرافنی است. لذا مده نقص القایی گرافن نامگذاری شده است. وابستگی مده نقص به فاصله بین نانولایه‌های گرافن و گذردهی الکتریکی دی الکتریک تحت تابش عمودی مورد مطالعه قرار گرفته است. از آن جایی که گذردهی نانولایه‌های گرافن از طریق رسانندگی سطحی وابسته به پتانسیل شیمیایی گرافن است، فرکانس مده نقص القایی گرافن قابلیت تنظیم از طریق اعمال ولتاژ گیت را دارد. علاوه بر این، توزیع میدان امواج الکترومغناطیسی در فرکانس مده نقص القایی گرافن در درون ساختار رسم شده است.

کلید واژه- پتانسیل شیمیایی، تنظیم پذیری، ساختار پریودیک، مده نقص، نانولایه گرافن.

## Properties of defect modes in a one-dimensional graphene based photonic crystal

Ziba Saleki<sup>1</sup>, Amir Madani<sup>2</sup> and Samad Roshan Entezar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Physics, University of Tabriz

<sup>2</sup> Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab

**Abstract-** In this paper the transmission properties of a defective one-dimensional dielectric-graphene periodic structure have been investigated using the transfer matrix method. The structure with a central defect consists of a stack of graphene nanolayers which are separated alternatively by the same dielectric layers. The results show that the suggested structure possesses a graphene induced photonic band gap (GIPBG) at low THz frequencies. Also, one defect mode is created in the GIPBG due to the breaking of the periodicity of the graphene lattice. So, we call it the graphene induced defect mode (GIDM). The dependence of the GIDM on the relative permittivity of dielectric layers and the thickness between graphene nanolayers has been studied at normal incidence. Since the permittivity of graphene nanolayer depends on its chemical potential, the frequency of the GIDM can be controlled via a gate voltage. Also, the electromagnetic field profile at the frequency of the GIDM inside the structure has been plotted.

**Keywords:** Chemical potential, Tunability, Periodic structure, Defect layer, Graphene nanolayer.

## ۱- مقدمه

در دو دهه گذشته انگیزه تازه‌ای با هدف مهندسی مواد که در آن‌ها نور منتشر نشود یا فقط در طول موج و یا جهت معینی منتشر شود یا در نواحی ویژه‌ای جایگزیده گردد، پدید آمده است. در این راستا بلورهای فوتونی، ساختارهای مصنوعی با ثابت دی الکتریک متنابض فضایی، به طور گستردگی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مهمترین ویژگی این ساختارهای لایه‌ای وجود گاف باند فوتونی است [۱]. مشخصه دیگر بلورهای فوتونی، جایگزیده کردن نور حول نقص ایجاد شده در ساختار می‌باشد. نقص در ساختار با تغییر دادن ثابت دی الکتریک و یا ضخامت یکی از لایه‌ها ایجاد می‌گردد [۲]. از طرفی قابل تنظیم بودن گاف باندها و مدهای نقص برای داشتن فیلترهای باند باریک از جنبه‌های اساسی کنترل طیف تراگسیل محاسبه می‌شود که با کنترل خواص اپتیکی مواد سازنده بلور قابل حصول است.

گرافن، آرایه‌ای دوبعدی از اتم‌های کربن در یک شبکه‌ی لانه زنبری، دارای خواص عمومی از جمله تحرک پذیری بالای حاملین بار، انعطاف پذیری و استحکام بالا می‌باشد. خواص اپتیکی و الکترونیکی آن وابسته به رسانندگی سطحی گرافن می‌باشد که آن نیز به نوبه خود با پتانسیل شیمیایی گرافن ارتباط دارد [۳]. از آنجایی که رسانندگی نوری گرافن در بازه‌ی فرکانسی گستردگی با اعمال ولتاژ گیت خارجی قابل کنترل است، گرافن یک ماده مناسب برای المان‌های نوری قابل تنظیم می‌باشد. بنابراین ساختارهای لایه‌ای دی الکتریک-گرافن یک بعدی که در آن گرافن نقش المان کننده را دارد، توجه کثیری از محققین را در ارتباطات نانو فوتونیک به خود جلب کرده است [۴].

در این مقاله با در نظر گرفتن یک ساختار پریودیک دی-الکتریک-گرافن یک بعدی حاوی نقص و با استفاده از روش ماتریس انتقال، طیف تراگسیل و رفتار مد نقص را به صورت تابعی از ضخامت بین نانولایه‌های گرافن و گذردهی نسبی لایه‌های دی الکتریک تحت تابش قائم مطالعه کرده و نشان داده‌ایم که با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن، می‌توان طول موج جایگزیده در داخل گاف باند را کنترل کرد.

## ۲- مدل و محاسبات تئوری

ساختار مورد مطالعه یک ساختار پریودیک یک بعدی حاوی نقص با آرایش  $(AGAG)^N D(GAGA)^N$  است که در محیط آزاد قرار گرفته است (شکل ۱). لایه‌های A، دی الکتریک همسانگرد و غیر مغناطیسی با ضربه گذردهی  $\epsilon = 2.5$  و ضخامت  $d = 10\mu m$  می‌باشند که نانولایه‌های گرافن را از هم جدا کرده‌اند. لایه D به ضخامت  $\epsilon = 2.5$  و  $d = 10\mu m$  نیز نمایشگر لایه‌ی نقص بوده و  $N = 6$  تعداد لایه‌های A در دو طرف لایه نقص است. لایه‌ها به موازات صفحه x-y بوده و محور z عمود بر لایه‌ها می‌باشد. ضخامت نانولایه‌های گرافن  $d = 1 nm$  فرض می‌شود. ویژگی اپتیکی گرافن با گذردهی نسبی آن  $\epsilon = 1 + i\sigma_g \eta_0 / k_0 d_g$  بیان می‌شود که در آن  $\eta_0$  امپدانس هوا و  $k_0 = 2\pi/\lambda$  بردار موج خلا و  $\sigma_g$  بیانگر رسانندگی سطحی گرافن است که بر اساس فرمول کوبو در فرکانس‌های پایین ( $\omega < \hbar\omega_c$ ) عبارت است از [۵]:

$$\sigma_g = \frac{e^2}{4\hbar} \frac{i}{2\pi} \left\{ \frac{16K_B T}{\hbar\omega} \ln(2 \cosh(\frac{\mu}{2K_B T})) \right\}. \quad (1)$$

در این رابطه e بار الکترون،  $k_B$  ثابت بولتزمن، T دمای مطلق و  $\mu_c$  پتانسیل شیمیایی گرافن می‌باشد. با استفاده از روش ماتریس انتقال [۶] تراگسیل ساختار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

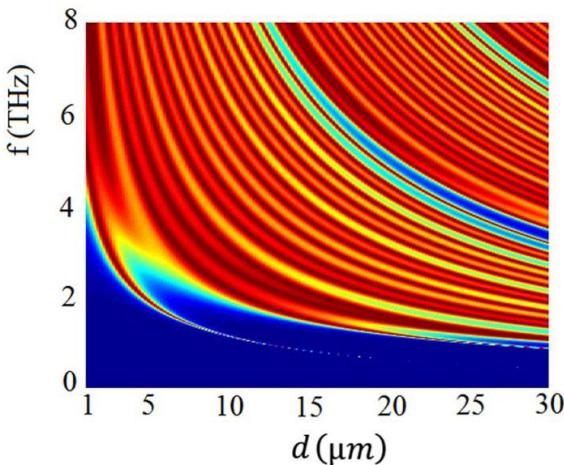
$$T = \left| \frac{1}{M(1,1)} \right|^2 \quad (2)$$

که  $M(1,1)$  عنصر (۱,۱) ماتریس انتقال کل ساختار،  $M = M_{in} (M_A M_G)^N M_D (M_G M_A)^N M_{out}$  است. ماتریس-های انتقال  $M_j$ ، مولفه‌های مماسی میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در ابتدا و انتهای لایه‌ی زام با ضخامت  $d_j$  را توسط رابطه زیر به هم مربوط می‌کنند:

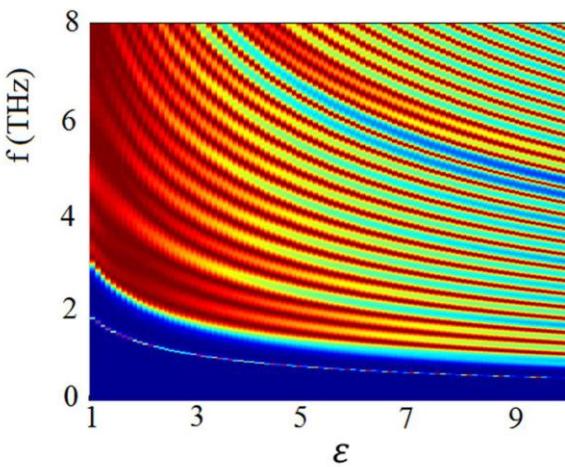
$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(k_z^j d_j) & -\frac{i}{q_z} \sin(k_z^j d_j) \\ -iq_z \sin(k_z^j d_j) & \cos(k_z^j d_j) \end{bmatrix} \quad (3)$$

در این رابطه  $j = A, D, G$  و برای قطبش TE  $q_j = -k_z^j / \omega \mu_0$ . برای امواج با قطبش TM نیز

آشکار است که با افزایش گذردهی الکتریکی محیط دی الکتریک، پهنهای گاف باند القایی گرافن کاهش یافته و فرکانس مد نقص القایی گرافن به سمت فرکانس‌های پایین جابجا می‌شود. در واقع افزایش گذردهی الکتریکی محیط دی الکتریک موجب کاهش اثرگذاری گرافن در ساختار می‌شود که آن هم منجر به باریک شدن گاف باند القایی گرافن می‌گردد.



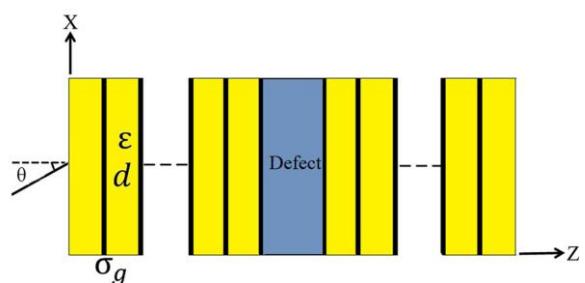
شکل ۲: طیف تراگسیل ساختار پریودیک دی الکتریک-گرافن حاوی نقص در صفحه (d,f) در حالت  $T=300\text{ K}$ ,  $\mu_c=0.2\text{ eV}$  در تابش قائم.



شکل ۳: طیف تراگسیل ساختار پریودیک دی الکتریک-گرافن حاوی نقص در صفحه ( $\epsilon, f$ ) در حالت  $T=300\text{ K}$ ,  $\mu_c=0.2\text{ eV}$  در تابش قائم. مشخصات لایه نقص عبارت است از:  $d_d = 5\text{ d}_\epsilon$  و  $\epsilon_d = \epsilon$ .

چنانچه ذکر شد گاف باند مذکور و مد نقص درون آن به دلیل وجود نانولایه‌های گرافن در محیط دی الکتریک تشکیل شده‌اند و برای ساختار مشابه و بدون لایه‌های گرافن کاملاً از بین می‌روند. بنابراین قابل پیش‌بینی است

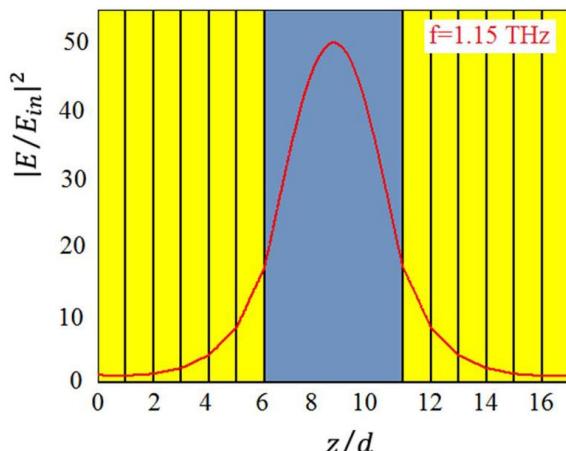
محاسبات به روش مشابه انجام می‌شود.



شکل ۱: ساختار پریودیک دی الکتریک-گرافن یک بعدی حاوی نقص.

### ۳- نتایج و بحث

با توجه به اتفاف کم نانولایه‌های گرافن در فرکانس‌های تراهertz محاسبات عددی این تحقیق در ناحیه‌ی فرکانسی THz (۰-۸) انجام شده است. تراگسیل تابش قائم از ساختار  $(AGAG)^6 D(GAGA)^6$  در صفحه (d,f) و برای حالت  $T=300\text{ K}$ ,  $\mu_c=0.2\text{ eV}$  در شکل ۲ رسم شده است. مشاهده می‌شود که برای تمامی مقادیر ضخامت بین نانولایه‌های گرافن (d)، فقط یک گاف فوتونی به نام گاف باند القایی گرافن [۷] در فرکانس‌های پایین تراهertz تشکیل می‌شود که با رنگ آبی تیره در شکل مشخص شده است. این گاف باند به خاطر وجود نانولایه‌های گرافن در دی الکتریک یکنواخت A تشکیل شده است. واضح است که با تغییر فاصله بین نانولایه‌های گرافن از ۱ تا ۳۰ میکرومتر، پهنهای گاف باند مذکور از  $\frac{4}{9}$  به  $\frac{1}{9}$  تراهertz تقلیل می‌یابد. هم چنین در داخل این گاف باند، یک مد نقص قابل مشاهده است که ناشی از شکست تناوب نانولایه‌های گرافن می‌باشد. بنابراین مدد حاصل شده مد نقص القایی گرافن نامگذاری می‌شود. لازم به ذکر است که این مد نقص به ازای  $d > 5\text{ }\mu\text{m}$  شروع به تشکیل شدن می‌کند و با افزایش فاصله بین نانولایه‌های گرافن به سمت فرکانس‌های کمتر جابجا می‌شود. از طرفی دیگر به ازای  $d > 15\text{ }\mu\text{m}$ ، مد نقص شروع به محو شدن می‌کند.علاوه بر پارامتر  $d$ ، پارامتر گذردهی الکتریکی محیط دی الکتریک هم می‌تواند در پاسخ نوری ساختار مهم باشد. برای بررسی این موضوع، نحوه واپستگی طیف تراگسیل ساختار پیشنهادی به گذردهی الکتریکی نسبی دی الکتریک در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این حالت  $d = 10\text{ }\mu\text{m}$  انتخاب شده است.



شکل ۵: توزیع فضایی شدت میدان الکتریکی در فرکانس مد نقص القایی گرافن  $1/15$  تراہتر در تابش عمودی و در حالت  $T = 300 K, \mu_c = 0.2 eV, d = 10 \mu m, d_d = 5d, \epsilon = 2.5$ .

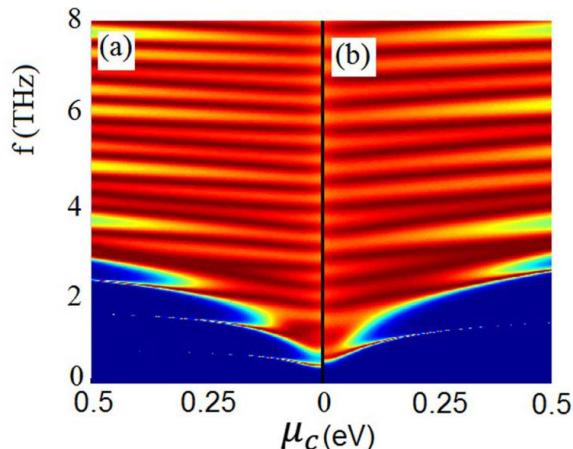
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله خواص تراگسیل یک ساختار پریویدیک یک بعدی دی الکتریک- گرافن حاوی نقص تحت پارامترهای مختلفی از جمله فاصله بین نانولایه‌های گرافن و گذردهی الکتریکی نسبی محیط دی الکتریک مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بیانگر وجود یک مد نقص در گاف باند القایی گرافن می‌باشد که ناشی از شکست تناوب شبکه گرافنی است. فرکانس مد نقص مربوطه با افزایش فاصله بین نانولایه‌های گرافن و گذردهی الکتریکی دی الکتریک به سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابجا می‌شود. هم‌چنین فرکانس آن از طریق اعمال ولتاژ گیت قابل کنترل می‌باشد.

#### مراجع

- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade, *photonic crystals: modeling the flow of light*, Princeton university press, 2011.
- [2] D. R. Smith, R. Dalichaouch, N. Kroll, S. Schultz, S. L. McCall, P. M. Platzman, "Photonic band structure and defects in one and two dimensions", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 10, No.2, pp. 314-321, 1993.
- [3] A. K. Geim, "Graphene: Status and Prospects", *Science*, Vol. 324, No. 5934, pp. 1530-1534, 2009.
- [4] C. S.R. Kaipa, A. B. Yakovlev, G. W. Hanson, Y. R. Padooru, F. Medina, F. Mesa, "Enhanced transmission with a graphene-dielectric microstructure at low-terahertz frequencies.", *Phys. Rev. B*, Vol. 85, pp. 245407, 2012.
- [5] L. A. Falkovsky, S.S. Pershoguba, "Optical far-infrared properties of graphene monolayer and multilayers", *Phys. Rev. B*, Vol. 76, pp. 153410(1-4), 2007.
- [6] P. Yeh, A. Yariv, and C-S Hong "Electromagnetic Propagation in periodic stratified media. I. General theory", *Optical Society of America*, Vol. 67, No. 4 ,pp. 423-438, 1977.
- [7] A. Madani, S.Roshan Entezar, "Optical properties of one-dimensional photonic crystals containing graphene sheets", *Physica B.*, Vol. 431, pp. 1-5, 2013.

که خواص آنها اعم از پهنهای گاف و فرکانس مد نقص درون آن وابسته به خواص اپتیکی گرافن باشد. برای بررسی این موضوع، نحوه وابستگی تراگسیل ساختار<sup>۶</sup> D(GAGA) به پتانسیل شیمیایی نانولایه‌های گرافن در شکل ۴ به ازای دو ضخامت مختلف لایه نقص (a)  $d_d = 10d$  (b)  $d_d = 5d$  نشان داده شده است. تغییر پتانسیل شیمیایی با اعمال ولتاژ گیت به نانولایه‌های گرافن انجام می‌گیرد. واضح است که با اعمال ولتاژ خارجی، فرکانس مد جایگزینه به طور پیوسته جابجا می‌شود. از اینرو، این ساختار می‌تواند به عنوان فیلتر THz قابل کنترل مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین با مقایسه شکلهای سمت راست و چپ می‌توان پی برد که با اعمال نقص خیلی عریض و پتانسیل شیمیایی بالاتر از  $0.25$  الکترون ولت، بیش از یک مد نقص القایی گرافن حاصل می‌شود که می‌تواند به عنوان فیلترهای چند کاناله مورد استفاده واقع گردد.



شکل ۴: طیف تراگسیل ساختار پریویدیک دی الکتریک- گرافن حاوی نقص در صفحه  $(\mu_c, f)$  در تابش قائم در حالت (a)  $d_d = 5d$  و (b)  $d_d = 10 \mu m, \epsilon = 2.5$ . در اینجا  $d = 10 d$  است.

برای بررسی بیشتر ویژگی‌های مد نقص القایی گرافن، توزیع میدان الکتریکی امواج الکترومغناطیسی در درون ساختار پریویدیک برای تابش قائم در فرکانس مد نقص القایی گرافن در شکل ۵  $f=1.15$  THz رسم شده است. این شکل به وضوح نشان می‌دهد که پروفایل میدان مربوط به فرکانس مد نقص القایی گرافن حول لایه نقص مرکزی نسبتاً عریضی جایگزینه می‌شود که این جایگزینگی بدون رفتار نوسانی که برای مدهای نقص مرسوم برآگ دیده می‌شد، صورت گرفته است.