

## خواص تراگسیل بلورهای فوتونی گرافن پایه یک بعدی حاوی نقص

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

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

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

چکیده - در این مقاله اثر نانولایه‌های گرافن بر خواص تراگسیل یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی نقص با استفاده از روش ماتریس انتقال مورد مطالعه قرار گرفته است. نشان داده شده است که دو نوع مد نقص در گاف باندهای ساختار ایجاد می‌شود، نوع اول مد نقص معمولی است که به علت شکست تناوب شبکه دی الکتریک در گاف باند براگ تشکیل می‌شود. نوع دیگر که در گاف باند القایی گرافن قابل مشاهده است ناشی از شکست تناوب شبکه گرافنی است. لذا مد نقص القایی گرافن نامگذاری شده است. هم چنین نتایج بیانگر این است که این مد نقص برخلاف مد نقص معمولی براگ فقط برای لایه‌ی نقص عریض ظاهر می‌گردد و از آن جایی که گذردهی نانولایه‌های گرافن از طریق رسانندگی سطحی وابسته به پتانسیل شیمیایی گرافن است، فرکانس مد نقص القایی گرافن از طریق اعمال ولتاژ گیت قابل کنترل می‌باشد.

کلید واژه - بلور فوتونی، پتانسیل شیمیایی، تنظیم پذیری، مد نقص، نانولایه گرافن.

### Transmission properties of one-dimensional graphene based defective photonic crystals

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 effect of graphene nano-layers on the transmission properties of a defective one-dimensional photonic crystal have been investigated using the transfer matrix method. It is shown that two kinds of the defect modes can be found in the band gaps of the structure. One kind is the traditional defect mode which is created in the Bragg gaps of the structure and is due to the breaking of the periodicity of the dielectric lattice. The other one is created in the graphene induced band gap. Such a defect mode which we call it the graphene induced defect mode (GIDM) is due to the breaking of the periodicity of the graphene lattice. However, our investigations reveal that only in the case of wide defect layers one can obtain the graphene induced defect modes. Since the permittivity of graphene nano-layer depends on its chemical potential, the frequency of the GIDMs can be controlled via a gate voltage.

Keywords: Photonic crystal, Chemical potential, Tunability, Defect layer, Graphene nano-layer.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت [www.opsi.ir](http://www.opsi.ir) قابل دسترسی باشد.

## ۱- مقدمه

بلورهای فوتونی ساختارهای مصنوعی با ثابت دی الکتریک متناوب فضایی هستند که به واسطه‌ی توانایی در کنترل و دستکاری جریان نور در چند دهه‌ی اخیر توجه کثیری از محققان را به سوی خود جلب کرده است. مهمترین ویژگی این ساختارهای لایه‌ای وجود گاف باند فوتونی یا نوار ممنوعه فرکانسی است که عبور امواج الکترومغناطیسی را در ناحیه فرکانسی معینی تقریباً ناممکن می‌سازد [1]. مشخصه دیگر بلورهای فوتونی، جایگزیده کردن نور حول نقص ایجاد شده در ساختار می‌باشد. اگر به هر ترتیبی ساختار تناوبی بلورهای فوتونی بهم زده شود، بلور دچار نقص می‌گردد که این امر با تغییر پارامترهای فیزیکی نظیر ضخامت و یا جنس لایه‌ها میسر می‌گردد [2]. از طرفی قابل تنظیم بودن گاف باندها و مدهای نقص برای داشتن فیلترهای باند باریک در ناحیه فرکانسی مطلوب از جنبه‌های اساسی کنترل طیف تراگسیل محسوب می‌شود که با کنترل خواص اپتیکی مواد سازنده بلور قابل حصول است. لذا محققین به استفاده از موادی روی آورده‌اند که خواص اپتیکی‌شان با عواملی مانند دما، میزان آلایندگی<sup>۱</sup>، ولتاژ و میدان مغناطیسی خارجی [3,4] قابل کنترل باشد.

گرافن آرایه‌ای دوبعدی از اتم‌های کربن در یک شبکه‌ی لانه زنبوری است که بنا به قابلیت تنظیم‌پذیری چگالی حاملین بار با اعمال ولتاژ می‌تواند جایگزین مناسبی برای موادی با پارامترهای قابل کنترل باشد. علاوه بر این اتلاف نور در ناحیه فرکانسی THz در بلورهای فوتونی حاوی گرافن، نسبت به ساختارهای شامل فلزات، نیمه رساناها و ابررساناها کمتر بوده و خواص اپتیکی و الکترونیکی آن وابسته به رسانندگی سطحی گرافن می‌باشد که آن نیز به نوبه خود با پتانسیل شیمیایی گرافن ارتباط دارد [5]. لذا می‌توان با تغییر تعداد حاملین بار از طریق اعمال ولتاژ گیت خارجی خواص اپتیکی گرافن را کنترل کرد. عوامل مذکور محققین را به مطالعه بلورهای فوتونی یک بعدی

شامل نانو لایه های گرافن که در آن گرافن نقش المان کنترل کننده را داشته باشد، سوق می‌دهد.

در این مقاله با در نظر گرفتن یک بلور فوتونی یک بعدی دی‌الکتریک- گرافن حاوی نقص و با استفاده از روش ماتریس انتقال، طیف تراگسیل و رفتار مد نقص را برای هر دو قطبش TE و TM مطالعه کرده و نشان داده‌ایم که با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن، می‌توان طول موج جایگزیده در داخل گاف باند را کنترل کرد.

## ۲- معرفی ساختار و محاسبات تئوری

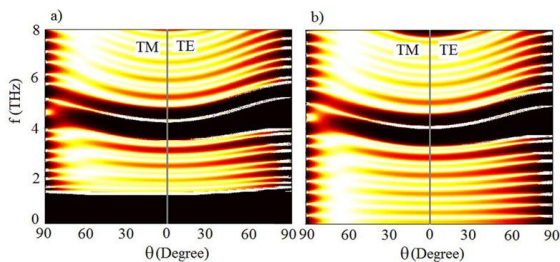
ساختار مورد مطالعه یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی نقص با آرایش  $(AGBG)^N D(GBGA)^N$  است که در محیط آزاد قرار گرفته است (شکل ۱). لایه های A و B، دی الکتریک های مختلف همسانگرد و غیر مغناطیسی با ضرایب گذرایی  $\epsilon_A = 5$  و  $\epsilon_B = 2.5$  و ضخامت‌های  $d_A = d_B = 10 \mu m$  می‌باشند. لایه D به ضخامت  $d_D$  و گذرایی  $\epsilon_D$  نیز نمایشگر لایه‌ی نقص بوده و  $N=5$  تعداد دوره در دو طرف لایه نقص است. در اینجا محور Z در راستای عمود بر مرز لایه‌ها که به موازات صفحه X-Y می‌باشند، در نظر گرفته شده است. نانولایه‌های گرافن با ضخامت  $d_G = 1 nm$  بین لایه‌های دی الکتریک قرار گرفته‌اند و ویژگی اپتیکی گرافن با گذرایی نسبی آن  $\eta_0$  بیان می‌شود که در آن  $\epsilon_G = 1 + i\sigma_G \eta_0 / k_0 d_G$  امپدانس هوا و  $k_0 = 2\pi/\lambda$  بردار موج خلأ و  $\sigma_g$  بیانگر رسانندگی سطحی گرافن است که بر اساس فرمول کوبو در فرکانسهای پایین ( $\hbar\omega < \mu_c$ ) عبارت است از [6]:

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

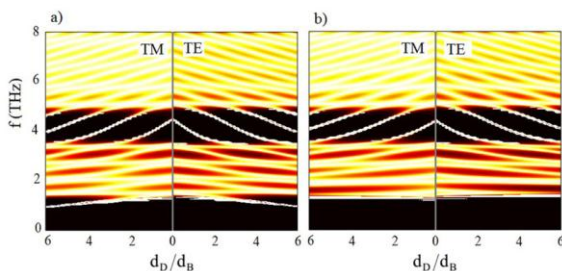
در این رابطه e بار الکترون،  $k_B$  ثابت بولتزمن، T دمای مطلق و  $\mu_c$  پتانسیل شیمیایی گرافن می‌باشد که از طریق ولتاژ گیت قابل کنترل است. فرض می‌شود موج تختی از هوا با زاویه  $\theta$  نسبت به خط عمود بر سطح ساختار به بلور تابیده شود. تراگسیل ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال [7] بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

نانولایه‌های گرافن  $(AB)^5(BA)^5$  در شکل ۲(b) رسم شده است. در این حالت به علت نبود لایه‌های گرافن، گاف باند القایی گرافن که ناشی از وجود گرافن درون ساختار بلور فوتونی بود، تشکیل نمی‌شود ولی مد نقص همچنان در داخل گاف باند براگ دیده می‌شود. بنابراین می‌توان به صراحت بیان کرد که تشکیل این مد نقص مستقل از وجود یا عدم وجود گرافن در ساختار است و صرفاً به خاطر شکسته شدن تناوب شبکه دی الکتریک ساختار در لایه مرکزی پدیدار گشته است. با توجه به اینکه در ساختار  $(AGBG)^5(GBGA)^5$  هیچ مد نقصی در گاف باند القایی گرافن مشاهده نشد، ساختاری را بررسی می‌کنیم که در آن لایه نقص D ضخامت غیر صفر  $(d_D \neq 0)$  داشته باشد. فرض می‌شود  $\epsilon_D = \epsilon_B$ . نحوه وابستگی طیف تراگیل ساختار  $(AGBG)^5D(GBGA)^5$  به ضخامت‌های مختلف لایه نقص در شکل ۳(a) نمایش داده شده است.



شکل ۲: تراگیل بلور فوتونی حاوی نقص در صفحه  $(f, \theta)$  در حالت  $T=300 K, \mu_c=0.2 eV$  و قطبش‌های TE و TM با ساختارهای (a)  $(AB)^5(BA)^5$  و (b)  $(AGBG)^5(GBGA)^5$

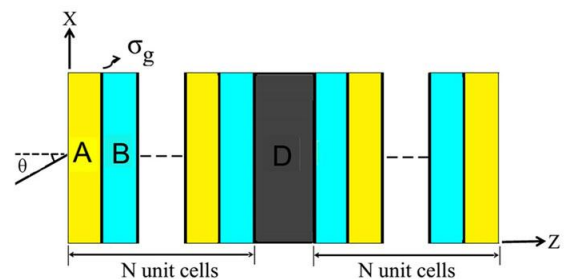


شکل ۳: طیف تراگیل ساختار  $(AGBG)^5D(GBGA)^5$  در صفحه  $(d_D/d_B, f)$  در حالت  $T=300 K, \mu_c=0.2 eV$  و قطبش‌های TE و TM در زاویه تابش  $\theta=30^\circ$ . در حالت (a) لایه نقص بدون نانولایه گرافن است. (b) لایه نقص حاوی نانولایه‌های گرافن است.

که  $M(1,1)$  عنصر  $(1,1)$  ماتریس انتقال کل ساختار،  $M=M_{in} (M_A M_G M_B M_G)^N M_D (M_G M_B M_G M_A)^N M_{out}$  است. ماتریس‌های انتقال  $M_j$ ، میدانهای الکتریکی ومغناطیسی در دو نقطه  $z$  و  $z+dz$  در هر لایه را توسط رابطه زیر به هم مربوط می‌کنند:

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

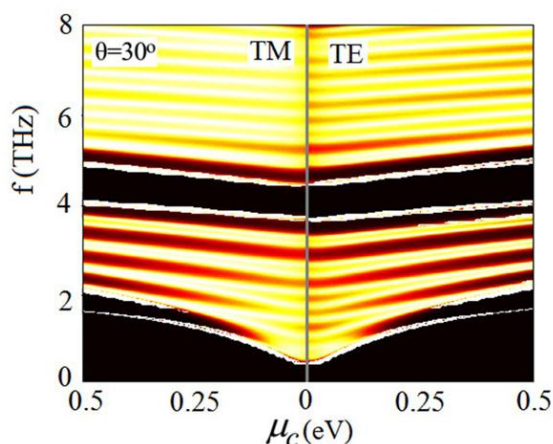
در این رابطه  $j = A, B, D, G$  و برای قطبش TE برای امواج با قطبش TM نیز  $q_j = -k_{zj} / \omega \mu_0$ . محاسبات به روش مشابه انجام می‌شود.



شکل ۱: ساختار بلور فوتونی یک بعدی نقص دار حاوی نانو لایه‌های گرافن

### ۳- نتایج و بحث

با توجه به اتلاف کم نانو لایه‌های گرافن در فرکانسهای تراهرتز محاسبات عددی این تحقیق در ناحیه‌ی فرکانسی THz  $(0-8)$  انجام شده است. تراگیل ساختار  $(AGBG)^5(GBGA)^5$  در شکل ۲(a)، در صفحه  $(f, \theta)$  و برای حالت  $T=300 K, \mu_c=0.2 eV$  و قطبش‌های TE و TM رسم شده است. این ساختار علیرغم اینکه در آن  $d_D=0$  انتخاب شده، دارای نقص است. قابل مشاهده است که دو گاف فوتونی کاملاً متفاوت در ناحیه فرکانسی مورد نظر تشکیل می‌شود که با رنگ تیره مشخص شده اند. گاف اول که در بازه THz  $(0-1/5)$  دیده می‌شود گاف باند القایی گرافن است که تقریباً تمام سویه است [8] و هیچ مد نقصی در آن دیده نمی‌شود. گاف باند دوم که در محدوده THz ۵ قرار دارد گاف معمولی براگ است که یک مد نقص را در برمی‌گیرد. جهت بررسی علت فیزیکی پیدایش این مد نقص، طیف تراگیل ساختار بدون



شکل ۴: طیف تراگسیل ساختار  $(AGBG)^5D(GBGA)^5$  در صفحه  $(\mu_c, f)$  در حالت  $d_D = 4d_B$  و قطبش‌های TE و TM در زاویه تابش  $\theta = 30^\circ$ .

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر نانولایه‌های گرافن بر خواص تراگسیل یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی نقص مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر مد نقص معمولی در گاف باند براگ، یک مد نقص جدیدی در گاف باند القایی گرافن تشکیل می‌شود که ناشی از شکست تناوب شبکه گرافنی است و 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] Y. H. Chang, Y. Y. JHU, Ch. J. Wu, "Temperature and bias dependences of defect mode in a photonic crystal containing a photonic-quantum-well defect", *Journal of optoelectronics and advanced materials*, Vol. 14, No. 3-4, pp. 185 - 192, 2012.
- [4] K. Smith, A. Chabanov, "Enhanced Transmission and Nonreciprocal Properties of a Ferromagnetic Metal Layer in One-Dimensional Photonic Crystals", *Integr. Ferroelectr: Int J.*, Vol. 131, No. 1, pp. 66-71, 2011.
- [5] A. K. Geim, "Graphene: Status and Prospects", *Science*, Vol. 324, No. 5934, pp. 1530-1534, 2009.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Madani, S.Roshan Entezar, "Optical properties of one-dimensional photonic crystals containing graphene sheets", *Physica B.*, Vol. 431, pp. 1-5, 2013.

از شکل پیداست که با افزایش ضخامت لایه نقص تعداد مدهای گاف باند براگ بیش از یک مد خواهد بود. در حالی که مد نقص در داخل گاف باند القایی گرافن به ازای لایه‌ی نقص عریض‌تر ( $d_D > 2d_B$ ) تشکیل می‌شود و با افزایش ضخامت لایه نقص هم چنان یک مد نقص در این گاف تشکیل می‌شود. این مطلب نشان می‌دهد که مد نقص جدید ناشی از شکست تناوب نانولایه‌های گرافن است. بنابراین مد حاصل شده مد نقص القایی گرافن نامگذاری می‌شود. برای درک بهتر منشأ فیزیکی مد نقص القایی گرافن، ساختاری در نظر می‌گیریم که در لایه نقص آن نانولایه‌های گرافن به فاصله  $d_B$  از یکدیگر جاسازی شده‌اند. در این حالت، در تناوب شبکه گرافن هیچ نقصی وارد نمی‌شود و انتظار داریم مد نقص القایی گرافن از بین برود که این امر در شکل ۳(b) به وضوح قابل رؤیت است.

چنانچه ذکر شد مد نقص جدید به دلیل نقص در شبکه تناوب نانولایه‌های گرافن در ساختار بلور فوتونی تشکیل شده است و با قرار دادن نانولایه‌های گرافنی در مکان مناسب در داخل لایه نقص به منظور حفظ تناوب شبکه گرافنی، مد نقص القایی گرافن ناپدید می‌شود. بنابراین قابل پیش بینی است که خواص مد نقص مذکور وابسته به خواص اپتیکی گرافن باشد. برای بررسی این موضوع، نحوه وابستگی تراگسیل ساختار  $(AGBG)^5D(GBGA)^5$  به پتانسیل شیمیایی نانو لایه-های گرافن در شکل ۴ نمایش داده شده است. تغییر پتانسیل شیمیایی با اعمال ولتاژ گیت به لایه‌های گرافن انجام می‌گیرد. واضح است که با اعمال ولتاژ خارجی، فرکانس مد جایگزیده به طور پیوسته جابجا می‌شود. از این رو، این ساختار می‌تواند به عنوان فیلتر THz قابل کنترل مورد استفاده قرار گیرد.