بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

مطالعه خواص تراگسیلی بلورهای فوتونی یک بعدی حاوی تک لایه‌های گرافن

امیر مدنی[۱]، صمد روشن انتظار[۲]، موسی فلکی خسروشاهی[۱] و رضا عبدی قلعه[۱]

[۱]گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی
[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده – در این مقاله خواص تراگسیلی یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی تک لایه‌های گرافن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشانگر وجود یک گاف فوتونی جدید در ناحیه فرکانسی *THz* می باشد که خواصی متفاوت از گاف فوتونی براگ در بلورهای فوتونی معمولی دارد و این تفاوت با رسم توزیع میدان امواج الکترومغناطیسی در درون بلور فوتونی برای فرکانسهای خاصی به وضوح قابل مشاهده است. این گاف جدید تا حد زیادی مستقل از زاویه تابش و قطبش بوده و خصوصیات آن به خواص اپتیکی تک لایه‌های گرافن وابسته است، لذا قابلیت تنظیم از طریق اعمال ولتاژ گیت را داراست.

کلید واژه- بلور فوتونی، تک لایه گرافن، تراگسیل، پتانسیل شیمیایی، تنظیم پذیر.

Study of the transmission properties of one-dimensional photonic crystals containing graphene monolayers

Amir Madani[۱], Samad Roshan Entezar[۲], Mousa Falaki[۱], and Reza Abdi-Ghaleh[۱]

[۱]Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab
[۲]Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz

Abstract- In this paper the transmission properties of a one-dimensional photonic crystal containing graphene monolayers are investigated. The results represent a new type of photonic band gap in THz frequencies which is different from conventional Bragg gaps. This difference is observable by plotting the electromagnetic field profiles inside the one-dimensional photonic crystal for some critical frequencies. The new type of band gap is independent of the incidence angle and polarization to a great extent and its properties depend on the optical properties of the graphene sheets, so it can be controlled via a gate voltage.

Keywords: Photonic crystal, Graphene monolayer, Transmission, Chemical potential, Tunable.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

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

۱- مقدمه

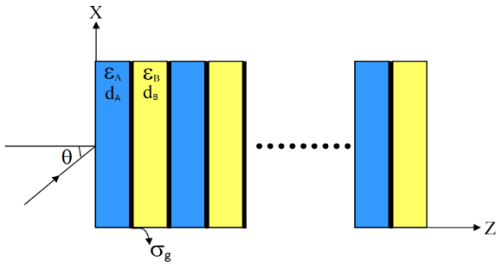
در سالهای اخیر، بلورهای فوتونی بعنوان موادی مصنوعی که ساختاری با خواص اپتیکی متناوب دارند، توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده اند .مهم ترین مشخصه این مواد وجود محدوده فرکانسی ممنوعه یا باند گاف فوتونی است که از تداخل پراکندگی های براگ در لایه های مختلف ساختار ناشی می شود [۱]. این گافها که موسوم به گاف براگ هستند معمولا وابستگی شدیدی به زاویه تابش، قطبش نور و پارامترهای هندسی بلور فوتونی دارند. در سالهای اخیر استفاده از مواد نوظهوری مثل متامواد بعنوان لایه های تشکیل دهنده بلورهای فوتونی یک بعدی تا حدودی امکان برطرف کردن این نقص را فراهم کرده است [۲]. از طرفی قابلیت تنظیم گافهای فوتونی بعنوان یک مزیت اساسی در کنترل خواص تراگسیلی بلور فوتونی مطرح می باشد. این امر با کنترل خواص اپتیکی مواد سازنده بلور امکان پذیر است، لذا محققین به استفاده از موادی با پارامترهای اپتیکی قابل تغییر مثل بلورهای مایع در درون بلورهای فوتونی روی آوردند [۳].

گرافن که شبکه ای لانه زنبوری و تک لایه از اتمهای کربن است، می تواند بعنوان مثالی دیگر از مواد با پارامترهای قابل کنترل مطرح شود. تحرک پذیری بالای حاملین بار، انعطاف پذیری و استحکام بالا از خواص عمومی گرافن می باشند. علاوه بر این، اتلاف تک لایه های گرافن در ناحیه فرکانسی THz در مقایسه با فلزات پایین است و خواص اپتیکی و الکترونیکی آن وابسته به رسانندگی سطحی گرافن می باشند که آن نیز به نوبه خود با پتانسیل شیمیایی گرافن ارتباط دارد [۴]. لذا می توان خواص اپتیکی گرافن را با تغییر تعداد حاملین بار از طریق اعمال ولتاژ گیت کنترل و تنظیم نمود. مجموعه این عوامل محققین را به مطالعه ادوات اپتیکی و فوتونیکی THz شامل تک لایه های گرافن سوق می دهند.

در این مقاله سعی می شود با استفاده از روش ماتریس انتقال به بررسی خواص اپتیکی یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی تک لایه های گرافن پرداخته شود. تعمیم روش ماتریس انتقال به ساختارهای لایه ای حاوی سطوح رسانا در سالهای اخیر مطالعه شده است [۵]. فرض شده است که تک لایه های گرافن میان لایه های دی الکتریک مختلف سازنده بلور جاسازی شده اند. تاثیر حضور گرافن بر روی خواص تراگسیل ساختار لایه ای و قابلیت تنظیم پذیری این خواص بوسیله تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن برای هر دو نوع قطبش TE و TM مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- مدل و محاسبات تئوری

ساختار مورد مطالعه یک بلور فوتونی یک بعدی با آرایش $(AB)^N$ است که در محیط آزاد قرار گرفته است (شکل ۱). بلور از دو نوع دی الکتریک مختلف با ضرایب گذردهی ε_A = ۵ و ε_B = ۲/۵ و ضخامت های $d_A = d_B = ۱۰\ \mu m$ تشکیل شده است و N =۱۵ عدد تناوب می باشد. لایه ها به موازات صفحه $x-y$ بوده و محور z عمود بر لایه ها می باشد.



شکل ۱: ساختار بلور فوتونی مورد مطالعه حاوی تک لایه های گرافن

تک لایه های گرافن میان لایه های دی الکتریک قرار گرفته اند و $\sigma_g(\omega)$ بیانگر رسانندگی سطحی گرافن است که بر اساس فرمول کوبو [۶] دارای دو بخش درون باندی و بین باندی است، $\sigma_g(\omega)=\sigma_g^{intra}(\omega)+\sigma_g^{inter}(\omega)$. با وجود این، در فرکانسهای پایین $(\hbar\omega<\mu_c)$ فقط بخش درون باندی $\sigma_g(\omega)$ از اهمیت برخوردار است. لذا در این مقاله

$$\sigma_g(\omega)=\sigma_g^{intra}(\omega)=\frac{e^2}{4\hbar}\frac{i}{2\pi}\left\{\frac{16k_BT}{\hbar\omega}\ln\left(2\cosh\left(\frac{\mu_c}{2k_BT}\right)\right)\right\} \quad (۱)$$

در نظر گرفته شده است. در این رابطه e بار الکترون، k_B ثابت بولتزمن، T دما برحسب کلوین و μ_c پتانسیل شیمیایی گرافن می باشند. با استفاده از روش ماتریس انتقال تراگسیل ساختار بصورت زیر محاسبه شده است [۷]:

$$T=\left|\frac{2q_0}{(q_tT_{11}+q_0T_{22})-(T_{21}+q_0q_tT_{12})}\right|^2 \quad (۲)$$

که در آن T_{ij} ها عناصر ماتریس انتقال کلی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

$T=[M_A(d_A,\omega)M_B(d_B,\omega)]^N$ هستند. برای قطبش TE $M_j(d_j,\omega)$ به صورت زیر محاسبه می شوند:

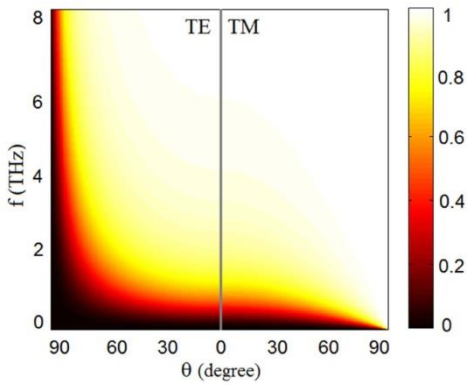
(۳)

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

که در این رابطه $q_j=\left(-k_{zj}/\omega\mu_0\mu_j\right)$ و $\mu_j=1$ و $(j=A,B)$. برای امواج با قطبش TM هم محاسبات به روش مشابه انجام می شود.

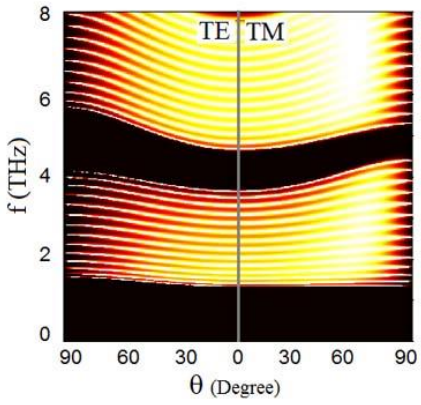
۳- نتایج و بحث

با توجه به اتلاف کم تک لایه های گرافن در فرکانسهای THz و مادون قرمز و همچنین اهمیت روزافزون ادوات اپتیکی و فوتونیکی THz، محاسبات عددی این تحقیق برای ناحیه فرکانسی THz (۰-۸) انجام شده است. در شکل ۲ تراگسیل یک تک لایه گرافن در صفحه (f,θ) و برای حالت μ_c =۰/۲ eV و T = ۳۰۰ K رسم شده است. از این شکل مشاهده می شود که تراگسیل یک تک لایه گرافن شدیدا به زاویه تابش و قطبش نور وابسته است. با وجود این، در ناحیه فرکانسی بسیار کوچکی (f <۰/۲۵THz) این وابستگی تا حدودی از بین رفته و تراگسیل صفر برای تمامی زوایای تابش و هر دو نوع قطبش حاصل می شود. با افزایش تعداد لایه های گرافن این ناحیه فرکانسی با تراگسیل صفر به تدریج پهن تر می شود و نهایتا منجر به ایجاد یک گاف فوتونی مستقل از زاویه تابش و مستقل از قطبش می گردد.



شکل ۲: تراگسیل یک تک لایه گرافن در صفحه (f,θ) و برای حالت μ_c =۰/۲ eV و T = ۳۰۰ K و قطبش های TE و TM.

برای نمایش دقیقتر این موضوع تراگسیل بلورفوتونی یک بعدی مورد مطالعه حاوی تک لایه های گرافن در شکل ۳ رسم شده است. در این شکل دو گاف فوتونی کاملا متفاوت در ناحیه فرکانسی مورد مطالعه مشاهده می شود که با رنگ تیره مشخص شده اند. گافی که در حوالی فرکانس ۵ THz قرار دارد، یک گاف براگ معمولی است که شدیدا به زاویه تابش و قطبش موج حساس است. گاف دیگر که در محدوده فرکانسی THz (۰-۱/۴) قرار گرفته کاملا متمایز از گافهای براگ می باشد و تا حد بسیار زیادی مستقل از زاویه تابش و مستقل از قطبش موج است. این امر امکان طراحی فیلترهای نوری کارآمدی را در ناحیه THZ فراهم می کند.

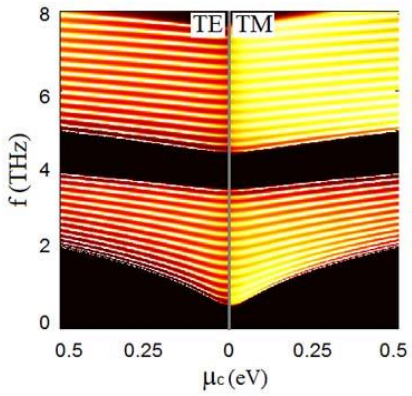


شکل ۳: تراگسیل بلور فوتونی یک بعدی حاوی تک لایه های گرافن در صفحه (f,θ) و برای حالت μ_c =۰/۲ eV و T = ۳۰۰ K و قطبش های TE و TM.

این گاف فوتونی جدید به دلیل وجود گرافن درون ساختار بلور فوتونی تشکیل شده است و برای بلور فوتونی مشابه و بدون لایه های گرافن کاملا از بین می رود. بنابراین قابل پیش بینی است که خواص آن اعم از پهنا و فرکانس مرکزی گاف وابسته به خواص اپتیکی گرافن باشند.

برای بررسی این موضوع، نحوه وابستگی تراگسیل ساختار به پتانسیل شیمیایی تک لایه های گرافن در شکل ۴ نمایش داده شده است. تغییر پتانسیل شیمیایی با اعمال ولتاژ گیت به لایه های گرافن انجام می گیرد. در کارهای تجربی، بدین منظور از الکترود های رسانا با شفافیت در ناحیه THz از قبیل لایه های نازک InSb استفاده می شود، با این وجود تحقیقات در این زمینه ادامه دارد [۸].

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]



شکل ۴: تراگسیل بلور فوتونی حاوی تک لایه های گرافن برای تابش عمودی بر حسب μ_c . T = ۳۰۰ K در نظر گرفته شده است.

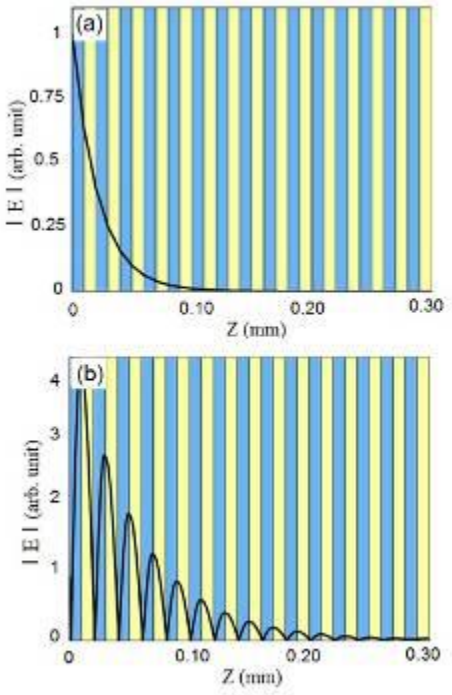
از این شکل پیداست که میزان حساسیت گاف فوتونی مربوط به تک لایه های گرافن به تغییرات پتانسیل شیمیایی بسیار شدید تر از حساسیت گاف براگ است و علاوه بر این ساختار رفتار کاملا مشابهی را برای هر دو نوع قطبش از خود نشان می دهد. لذا چنین ساختاری می تواند در ساخت فیلتر های THz تنظیم پذیر و قابل کنترل کاربرد داشته باشد.

برای بررسی بیشتر تفاوت های دو نوع گاف فوتونی مذکور، توزیع میدان الکتریکی امواج الکترومغناطیسی در درون بلور فوتونی و برای دو فرکانس خاص رسم شده اند. شکل (a-۵) مربوط به f =۰/۶۷ THz (فرکانس مرکزی گاف فوتونی وابسته به گرافن) و شکل (b-۵) مربوط به f =۴/۲ THz (فرکانس مرکزی گاف فوتونی براگ) می باشند که برای تابش عمودی، μ_c =۰/۲ eV و T = ۳۰۰ K رسم شده اند.

این شکل به وضوح نشان می دهد که پروفایل میدان مربوط به فرکانس گاف فوتونی وابسته به گرافن در درون ساختار بلور هیچ گونه رفتار نوسانی از خود نشان نمی دهد و به شدت میراست (شکل a-۵). درحالیکه امواج تابشی با فرکانس درون گاف براگ رفتار نوسانی دارند و در مقایسه با حالت قبل از میرایی کمتری برخوردارند (شکلb-۵).

۴- نتیجه گیری

در این مقاله خواص تراگسیلی یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی تک لایه های گرافن مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه انجام شده نشان می دهد که ساختار باند بلور مذکور دارای یک گاف فوتونی مستقل از زاویه و مستقل از قطبش در ناحیه THz است که کاملا از گافهای براگ معمولی متفاوت است و قابلیت تنظیم بوسیله کنترل پتانسیل شیمیایی گرافن را داراست.



شکل ۵: توزیع میدان الکتریکی امواج الکترومغناطیسی در درون بلور فوتونی و برای دو فرکانس a) f =۰/۶۷ THz و b) f =۴/۲ THz برای تابش عمودی، μ_c =۰/۲ eV و T = ۳۰۰ K.

مراجع

[۱] Joannopoulos J., Meade R., Winn J., *Photonic crystals*, Princeton Univ. Press, Princeton, (۱۹۹۵).

[۲] Li J., Zhou L.,, Chan C. T., Sheng P., Photonic Band Gap from a Stack of Positive and Negative Index Materials, **Phys. Rev. Lett.** ۹۰ (۲۰۰۳) ۰۸۳۹۰۱-٤.

[۳] Miroshnichenko A., Pinkevych I., Kivshar Y., Tunable all-optical switching in periodic structures with liquid-crystal defects, **Optics Express** ١٤ (٢٠٠٦) ٢٨٣٩-٢٨٤٤.

[٤] Geim A., Graphene: Status and Prospects, **Science**, ٣٢٤ (٢٠٠٩) ١٥٣٠-١٥٣٤.

[٥] Khorasani S., Rashidian B., Modified transfer matrix method for conducting interfaces**, J. Opt. A: Pure Appl. Opt.** ٤ (٢٠٠٢) ٢٥١–٢٥٦.

[٦] Falkovsky L., Pershoguba S., Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer, **Phys. Rev. B** ٧٦ (٢٠٠٧) ١٥٣٤١٠-٤.

[٧] Yeh P., Yariv A., Hong C., Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory, **JOSA** ٦٧ (١٩٧٧) ٤٢٣-٤٣٨.

[٨] Iorsh I., Mukhin I., Shadrivov I., Belov P., Kivshar Y., Hyperbolic metamaterials based on multilayer graphene structures, **Phys. Rev. B** ٧٦ (٢٠١٣) ٠٧٥٤١٦-٦.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]