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

بررسی گاف باند فوتونی بلورهای فوتونی گرافنی یک بعدی

عبدالرحمن نامدار، جعفر لطفی، بابک عبدالهی پور

دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز، فلکه دانشگاه تبری

چکیده – ما در این مقاله با استفاده از روش ماتریس انتقال به بررسی ویژگی‌های گاف باند فوتونی بلورهای فوتونی گرافنی یک بعدی می‌پردازیم. ساختاری را در نظر می‌گیریم که در آن لایه‌های یکسان گرافن تک‌لایه به صورت متناوب توسط لایه‌ی هوا از هم جدا شده-اند. وابستگی گاف باند فوتونی به نوع قطبش و ضخامت لایه‌ی هوا برای فرکانس‌ها و زوایای فرود متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج می‌تواند برای طراحی ابزارهای اپتیکی بر پایه‌ی بلورهای فوتونی گرافنی مورد استفاده قرار بگیرد.

کلید واژه- ویژگی های اپتیکی، بلور فوتونی، گرافن، رسانندگی نور.

Investigation of photonic band gaps of one-dimensional graphene photonic crystal

Abdolrahman Namdar, Jafar Lotfi, Babak Abdollaipour

Faculty of Physics,University of Tabriz,Tabriz

Abstract- In this paper, we investigate the properties of photonic band gap in one-dimensional graphen photonic crystal with transfer matrix method. We consider the structure in which, single-layer grapheme layers separated alternatively by air laye. The dependence of photonic band gap on polarization and air layer thickness for different frequencies and incident angles are considered. These results can be used to design optic devices based on graphen photonic crystals.

Keywords: optical properties, photonic crystal, graphene, optical conductivity

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

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

۱- مقدمه

بلور فوتونی یک بعدی از لایه های متناوبی از مواد تشکیل شده است. این بلور ها در برابر امواج نوری همان رفتاری را دارند که نیمه رساناها در مقابل امواج الکترونی از خود نشان می دهند. مشخصه اصلی بلورهای فوتونی که نوعا بصورت مصنوعی ساخته می‌شوند، دوره‌ای بودن ثوابت دی الکتریک در آن‌ها می‌باشد[۱].

گرافن تک لایه دارای ضخامتی در حدود یک اتم کربن است، و به دلیل خواص الکترونیکی منحصر به فردش توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تحرک پذیری بالای حامل‌ها در گرافن آن را به یک ماده‌ی ایده آل برای نانو الکترونیک بر پایه‌ی کربنی مبدل ساخته است[۲،۳]. ساختار نواری گرافن تک لایه با استفاده از تقریب بستگی قوی قابل محاسبه است، نتایج نشان می‌دهد که بین دو نوار اول گاف انرژی وجود ندارد وگرافن تک لایه یک نیمه‌رسانای بدون گاف است[۴].

۲- بیان مسئله و روش محاسبات

ما در این جا برای بررسی خواص اپتیکی ساختارهایی نظیر شکل (۱) را در نظر خواهیم گرفت. ما ساختاری را مطالعه خواهیم کرد که در آن لایه های گرافن با رسانندگی نوری (σ) توسط لایه‌ی هوا (ε=۱) به ضخامت d از همدیگر جدا شده‌اند. بازتابندگی و جذب برای چنین ساختاری در حالت تابش عمود در مرجع[۵] مطالعه شده-است. که ما نیز در ادامه‌ی آن باند گاف فوتونی را برای چنین ساختاری در هر دو قطبش s و p به ازای تمامی زوایای فرود بررسی خواهیم کرد.

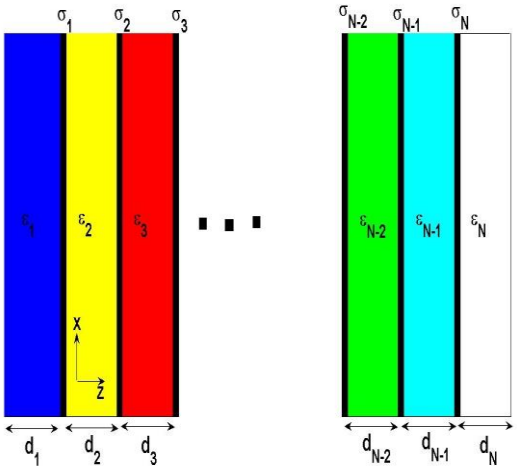
برای این کار از روش ماتریس انتقال استفاده خواهیم کرد. می توان نشان داد که برای توصیف انتقال نور از محیط ۱ به محیط ۲ در ساختاری نظیر ساختار شکل(۱) ماتریس انتقال به ازای قطبش s از رابطه‌ی زیر تبعیت می‌کند:

$$D_{1\longrightarrow 2}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1+\eta_s+\xi_s & 1-\eta_s-\xi_s\\ 1+\eta_s-\xi_s & 1+\eta_s+\xi_s\end{pmatrix} \quad (۱)$$

که در آن $\xi_s=\mu_0\omega\sigma/k_{1z}$ و η_s=k۲z/k۱z است و kiz مولفه‌ی zام بردار موج در محیط i ام می باشد. و σ رسانندگی و μ. تراوایی خلا و ω فرکانس زاویه‌ای می-باشد. و ماتریس انتقال به ازای قطبش p از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید[۵].

$$D_{1\longrightarrow 2}=\frac{1}{2}\begin{pmatrix}1+\eta_p+\xi_p & 1-\eta_p-\xi_p\\ 1-\eta_p-\xi_p & 1+\eta_p+\xi_p\end{pmatrix} \quad (۲)$$

که در آن $\xi_p=\frac{\sigma k_{2z}}{\varepsilon_0\varepsilon_2\omega}$ و $\eta_p=\frac{\varepsilon_1 k_{2z}}{\varepsilon_2 k_{1z}}$ می‌باشد و ε_0 گذردهی خلا است.



شکل۱- در ساختار فوق دی الکتریک ها با ضریب دی الکتریکεi و با ضخامت di مشخص شده‌اند. همچنین لایه‌های گرافن با رسانندگی های σ i هستند.

بعلاوه انتشار نور در طول لایه‌ی همگن به ضخامت Δz توسط ماتریس انتشار صورت می‌گیرد:

$$P(\Delta z)=\begin{bmatrix}e^{-ik_z\Delta z} & 0\\ 0 & e^{ik_z\Delta z}\end{bmatrix} \quad (۳)$$

ماتریس انتقال کل برای N لایه‌ی بلور فوتونی، از ضرب ماتریسی ماتریس های ذکر شده بدست می‌آید که طبق روابط زیر بیان می‌شود.

$$M=\begin{pmatrix}M_{11} & M_{12}\\ M_{21} & M_{22}\end{pmatrix} \quad (۴)$$

$$=D_{1\to 2}P(d_2)D_{2\to 3}P(d_3)\ldots P(d_N)D_{N\to N+1}$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

ضرایب بازتاب و عبور از طریق عناصر ماتریس انتقال کل M به دست می آیند.

$$t=\frac{1}{M_{11}} \quad و \quad r=\frac{M_{21}}{M_{11}} \qquad (۵)$$

تراگسیلندگی و بازتابندگی برای قطبش های s و p به صورت زیر می باشد.

$$R_{s,p}=\left|r_{s,p}\right|^2 \text{ و } T_{s,p}=\eta_{s,p}\left|t_{s,p}\right|^2 \qquad (۶)$$

که در آن پارامترهای η_s و η_p صورت $\eta_s=\frac{k_{(N+1)z}}{k_{1z}}$ و $\eta_p=\varepsilon_1 k_{(N+1)z}/\varepsilon_{N+1}k_{1z}$ هستند. جذب نیز به راحتی از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است.

$$A=1-R-T \qquad (۷)$$

قابل ذکر است که، در کار حاضر ما رسانندگی نوری گرافن تک لایه را فقط در حالتی که پتانسیل شیمیایی گرافن تک لایه (μ) خیلی بیشتر از دما باشد، بررسی می-کنیم. در این حالت رسانندگی گرافن تک لایه از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۶]:

$$\frac{\sigma(\Omega)}{\varepsilon_0 c\alpha}=4\frac{i}{\Omega}+\pi\left[\vartheta(\Omega-2)+\frac{i}{\pi}\ln\left(\frac{\Omega-2}{\Omega+2}\right)\right] \qquad (۸)$$

که در آن $\Omega=\frac{\hbar\omega}{\mu}$ فرکانس بدون دیمانسیون است و $\alpha\approx\frac{1}{137}$ ثابت ریز شبکه و $\vartheta(x)$ تابع پله‌ای هویساید می باشد.

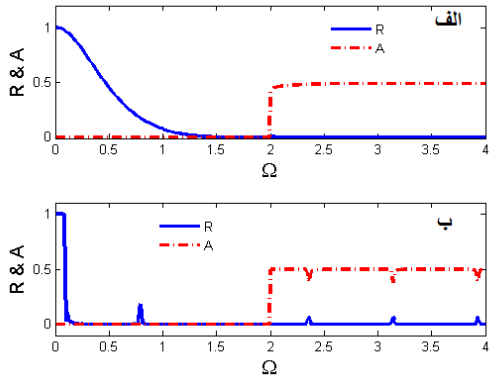
۳- نتیجه گیری

ابتدا ویژگی های اپتیکی ساختاری نظیر ساختار شکل (۱) را که لایه های گرافن تشکیل دهنده‌ی آن توسط لایه‌های هوا با ضخامت d از هم جدا شده‌اند، را به ازای تابش قائم برای فرکانس‌های متفاوت بررسی می کنیم.

نمودارهای (الف) و (ب) شکل (۲) نشان می‌دهند که در فرکانس‌های پایین یک فرکانس قطع برای بازتاب وجود دارد که به ازای فرکانس‌های بالاتر ار آن هیچ بازتابی صورت نمی‌گیرد. همچنین با استفاده از نمودار می‌توان فهمید که تا فرکانس مربوط به $\Omega<2$ هیچ جذبی وجود ندارد که با رفتار رسانندگی نوری گرافن تک لایه که همخوانی دارد. چرا که قسمت حقیقی رسانندگی گرافن برای فرکانس‌های $\Omega<2$ صفر می‌باشد.

همچنین رفتار جذب برای فرکانس‌های مربوط به $\Omega>2$ نشان می دهد که در حدود نیمی از نور فرودی در ساختار جذب می‌شود که جذب قابل توجه ای می‌باشد.

همچنین با مقایسه قسمت های (الف) و (ب) شکل (۲) به این نتیجه می رسیم که با افزایش فاصله بین لایه‌های گرافن افت و خیزهایی در نمودار ایجاد می‌شود، که در نتیجه‌ی تداخلهای چندگانه بین لایه‌های گرافن به وجود آمده است.



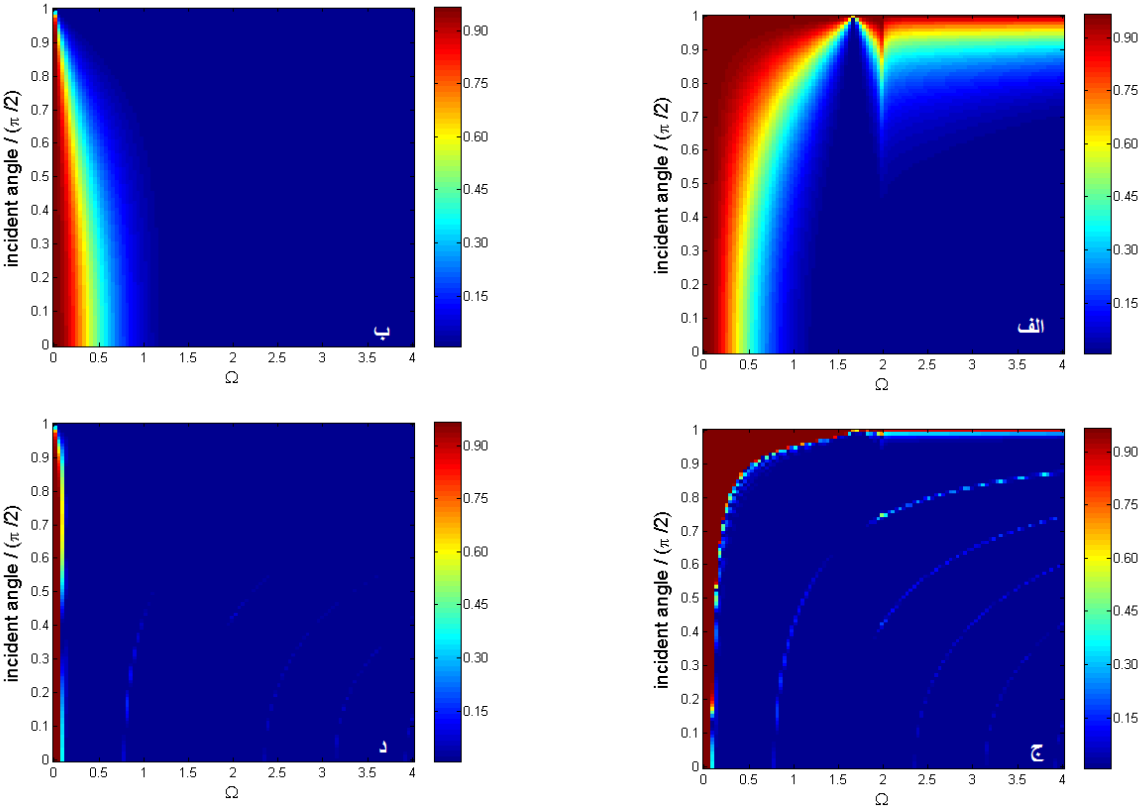
شکل۲- ویژگی‌های اپتیکی ساختار تشکیل یافته از گرافن‌های تک لایه که توسط لایه‌ی هوا با ضخامتd از همدیگر جدا شده اند. (تعداد لایه‌ها=۳۰) خطوط پر آبی رنگ نشان دهنده‌ی بازتابندگی و خطوط نقطه چین قرمز رنگ نشان دهنده‌ی جذب می‌باشد. الف) به ازای $\mu=0.1ev$ d=۰.۰۴*$\hbar$ *c/μ و (ب) به ازای d=۴*$\hbar$ *c/μ .

حال به بررسی وابستگی گاف باند فوتونی ساختار یاد شده می‌پردازیم. در شکل (۳) ساختار باند به ازای فرکانس‌ها و زوایای فرود متفاوت برای قطبش s و p رسم شده است.

در قسمت (الف) شکل(۳) گاف باند به ازای قطبش s و $d=\frac{0.04\hbar c}{\mu}$ ترسیم شده است. قسمت‌هایی از نمودار که به رنگ قهوه‌ای می‌باشد نماینده‌ی گاف باند فوتونی می‌باشد(R=۱)، و رنگ آبی هم نشانگر این است که هیچ

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

گونه بازتابی در آن نقطه از نمودار وجود ندارد(R=۰)، یعنی در آن نقاط گاف باند فوتونی نداریم. در قسمت (ب) شکل(۳) نیز باند گاف به ازای قطبش p و ضخامت لایه‌ی



شکل۳- باندگاف فوتونی به ازای فرکانس بی بعد شده Ω (محور افقی) و زاویه‌ی فرودی تقسیم بر $\pi/2$ (محور قائم)را نشان می-دهد. (الف) و (ج) به ازای قطبش s به ترتیب برای d=۰،۰۴*$\hbar$ *c/μ و d=۴*$\hbar$ *c/μ . (ب) و (د) به ازای قطبشp به ترتیب برای d=۰،۰۴*$\hbar$ *c/μ و d=۴*$\hbar$ *c/μ . نشانگر رنگی مجاور نمودارها به صورتی است که رنگ آبی سیر R=۰ و رنگ قهوه‌ای سیر R=۱ را نشان دهد، و به ازای مابقی مقادیر R رنگ‌هایی مطابق نشانگر رنگی اختصاص داده شده است.

هوا $d=\frac{0.04\hbar c}{\mu}$ رسم شده‌است. شکل نشان می‌دهد که شانس دست یابی به باند گاف در فرکانس‌های کوچکتر بیشتر می‌باشد.

قسمت‌های (ج) و (د) ساختار گاف باند فوتونی را به ازای $d=\frac{4\hbar c}{\mu}$ به ترتیب برای قطبش‌های s و p نشان می‌دهد. با توجه به نمودار می‌توان متوجه شد که افزایش فاصله بین لایه‌های گرافنی موجب کاهش دسترسی به باند گاف فوتونی در هردو قطبش گردیده است. بنابراین برای دستیابی به باندگاف‌فوتونی فاصله‌ی $d=\frac{0.04\hbar c}{\mu}$ مناسب‌تر می‌باشد. و در کل از بین چهار حالت شکل(۳) راحت‌ترین حالت برای دستیابی به باند گاف فوتونی به منظور استفاده در ابزارهای اپتیکی حالت (الف) شکل(۳) است.

مراجع

[۱] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, Photonic Crystal: molding the flow of light **Priceton University Press**, Princeton, (۱۹۹۵).

[۲] F. Xia, T. Mueller, Yu. Lin, A. V. Garcia and P. Avouris; "Ultrafast graphene photodetector "; ***Nature photonics***, ۸۴۳, vol. ٤ (۲۰۰۹) .

[۳] M. M. Fogler, L. I. Glazman, D. S. Novikov, and B. I. Shklovskii,"*Effect od disorder on a graphene p-n junction*", **Phys. Rev**. B ۷۷ ۰۷۵۴۲۰ (۲۰۰۸).

[٤] A.K. Geim and K.S. Novoselov; "The Rise Of Graphene "; *Publishing Group*, ***Nature*** ,(۲۰۰۷).

[٥] Tianrong Zhan, Xi Shi, Yunyun Dai, Xiaohan Liu and Jian Zi,*''Transfer matrix method for optics in graphene layers''* **J. Physics: Conden.** Matt. ۲۵, ۲۱۵۳۰۱ (۲۰۱۳).

[٦] Wunsch B, Stauber T, Sols F and Guinea F *New* ***J.Phys.*** ۸ ۳۱۸ (۲۰۰٦).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]