

تأثیر گرادیان ضخامت خطی بر بلور فوتونی گرافنی تنظیم‌پذیر در ناحیه تراهرتز

مرضیه رنجبر*^۱، علیرضا جنگجو^۲

۱. مربی، گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور

۲. مرکز تکنولوژی پیشرفته امواج فوتوآکوستیک، دپارتمان مهندسی مکانیک، دانشگاه تورنتو، تورنتو، کانادا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰

The Effect of Linear Gradation of Thickness on Tunable Graphene Photonic Crystals in THz Region

M. Ranjbar*¹, A.R. Jangjoo²

1. Instructor, Department of physics, Payame Noor University

2. Center for Advanced Diffusion-Wave and Photoacoustic Technologies, Dept. of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada

Received: 2020/12/02

Accepted: 2021/01/09

Abstract

By using the transfer matrix method, the optical properties of two one-dimensional tunable photonic crystal structures are investigated and compared with each other. The structure of the first photonic crystal consists of alternating layers of two dielectrics SiO₂ and Si, with graphene layers between the dielectric layers. By adding polystyrene polymer as the defect layer to the photonic crystal structure, the defect mode appears within the photonic bandgap. This defect mode is tunable with the chemical potential of graphene and the wave incidence angle. In the structure of the second photonic crystal, one of the dielectric layers of the first crystal structure has a linear gradation. The defect mode is plotted for three structures with different linear gradation thicknesses and compared with the non-graded. The location of Defect modes in the crystal structure with linear graded in comparison with non-graded, shifts to lower frequencies. In both structures, the effect of the chemical potential of graphene and the incident angle of the transverse electric and transverse magnetic waves on the tuning of the location of the defect mode and photonic bandgap and graphene photonic bandgap are investigated. By increasing the chemical potential of graphene and the wave incidence angle, the location of the defect mode shifts to higher frequencies. These two structures can be used in designing the tunable terahertz filters.

Keywords

One-Dimensional Graphene Photonic Crystals, Tunable Filter, Polystyrene Polymer, THz Region

چکیده

با استفاده از روش ماتریس انتقال، خواص اپتیکی دو ساختار بلور فوتونی تنظیم‌پذیر یک بعدی بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. ساختار بلور فوتونی اول شامل لایه‌های متناوب دو دی الکتریک SiO₂ و Si است که لایه‌های گرافنی بین لایه‌های دی الکتریک قرار گرفته‌اند. با افزودن پلیمر پلی استایرن به عنوان لایه نقص به ساختار بلور فوتونی، مد نقص در محدوده نوار گاف فوتونی ظاهر می‌شود. این مد نقص با پتانسیل شیمیایی گرافن و زاویه موج فرودی تنظیم پذیر است. در ساختار بلور فوتونی دوم، یکی از لایه‌های دی الکتریک ساختار بلوری اول دارای گرادیان خطی است. مد نقص برای سه ساختار با گرادیان‌های ضخامت خطی متفاوت رسم شده و با حالت فاقد گرادیان مقایسه شده است. مکان مدهای نقص در ساختار بلور با گرادیان خطی در مقایسه با حالت فاقد گرادیان به سمت فرکانس‌های کمتر جابجا می‌شوند. در هر دو ساختار تأثیر پتانسیل شیمیایی گرافن و زاویه فرودی موج قطبیده TE و TM بر تنظیم‌پذیری مکان مد نقص و نوارگاف فوتونی و نوار گاف فوتونی گرافنی بررسی شده است. با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن و زاویه موج فرودی مکان مد نقص به سمت فرکانس‌های بیشتر جابجا می‌شود. از این دو ساختار می‌توان در طراحی فیلترهای تراهرتز قابل تنظیم استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی

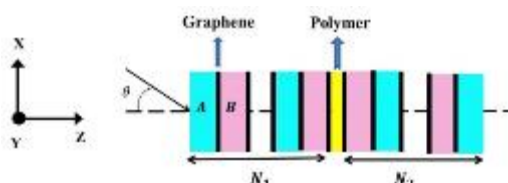
بلور فوتونی گرافنی یک‌بعدی، فیلتر تنظیم‌پذیر، پلیمر پلی استایرن، ناحیه تراهرتز

مقدمه

پس از آن که یابلونویچ و جان برای اولین بار اصطلاح بلور فوتونی را ارائه دادند، ساختارهای بلوری بسیاری پیشنهاد شده و خواص آنها مورد بررسی قرار گرفته است [۱-۴]. میزان ضخامت و نوع مواد تشکیل دهنده لایه‌های این ساختارهای متناوب از اهمیت بالایی برخوردار است، به طوری که کاربرد بلور فوتونی را در یک محدوده فرکانسی ویژه تعیین می‌کند. هنگامی که امواج الکترومغناطیسی در ساختار بلور فوتونی منتشر می‌شوند، محدوده فرکانسی خاصی از امواج نمی‌توانند از ساختار بلور عبور کنند. این محدوده ممنوعه تحت عنوان نوار گاف فوتونی معرفی می‌شود که تشخیص مکان نوار گاف فوتونی، محاسبه و اندازه‌گیری پهنای نوار گاف و تنظیم آن برای طراحی بلورهای فوتونی بسیار حائز اهمیت است. با تغییر ضخامت هر یک از لایه‌های بلور یا افزودن یک ماده با ضریب گذردهی الکتریکی متفاوت به ساختار بلور فوتونی، نظم دوره‌ای ساختار بلور شکسته و یک مد نقص در ناحیه نوار گاف فوتونی ظاهر می‌شود [۵-۸]. در طراحی وسایل الکترواپتیکی مانند فیلترها [۹]، موجرها [۱۰]، سنسورها و حسگرهای زیستی [۱۱-۱۲] از این ویژگی منحصر به فرد بلورهای فوتونی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، تنظیم‌پذیری خواص اپتیکی ساختارهای بلور فوتونی و بهره‌مند شدن از آن به منظور طراحی و ساخت وسایل اپتیکی در محدوده تراهرتز توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۱۳-۱۵]. دسته‌ای از مواد با ضریب گذردهی الکتریکی خاص خود می‌توانند ولتاژ، میدان مغناطیسی خارجی و دما را تنظیم کنند [۱۶]. گرافن با ساختار بلوری دو بعدی لانه زنبوری، یکی از این مواد کاربردی و مهم در محدوده فرکانس تراهرتز است [۱۸-۱۷]. یکی از فاکتورهای مؤثر در تنظیم‌پذیری رسانندگی سطحی گرافن تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن است که به ولتاژ گیت خارجی وابسته است. هنگامی که نانو لایه‌های گرافن در ساختارهای بلوری قرار داده می‌شوند، نوار گاف دیگری علاوه بر نوار گاف فوتونی، در محدوده تراهرتز پایین ظاهر می‌شود که نوار گاف فوتونی گرافنی نامیده می‌شود [۱۹]. در این مقاله برای انجام محاسبات از روش ماتریس انتقال استفاده شده است.

مواد و روش محاسبات

ساختار بلوری پیشنهادی مطابق شکل ۱ به صورت $[(AGBG)^{N_1}P][(GBGA)^{N_2}]$ متشکل از لایه‌های متناوب A و B که به ترتیب Si و SiO_2 هستند در نظر گرفته شده است به طوری که نانو لایه‌های گرافنی بین هر یک از لایه‌ها قرار گرفته و پلیمر پلی استایرن به عنوان لایه نقص در ساختار بلوری قرار داده شده است. در اینجا فرض شده است که ساختار بلور فوتونی در دمای اتاق قرار گرفته و محیط اطرافش با هوا احاطه شده است. هر لایه از ساختار بلور فوتونی به موازات صفحه XY در نظر گرفته شده است به طوری که محور Z عمود بر راستای بلور باشد و موج فرودی با محور Z زاویه θ بسازد.



شکل ۱. ساختار بلور فوتونی گرافنی تنظیم‌پذیر $[(AGBG)^{N_1}P][(GBGA)^{N_2}]$

گرافن

گرافن یک ماده ناهمسان‌گرد تک‌محوری است که ماهیت دو بعدی دارد. با توجه به شکل ۱، صفحات گرافن در صفحه X-Y قرار گرفته‌اند، بنابراین تانسور گذردهی الکتریکی گرافن اینگونه بیان می‌شود [۲۰].

$$\epsilon_G = \begin{bmatrix} \epsilon_{G,t} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{G,t} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{G,\perp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

میدان الکتریکی عمودی نمی‌تواند هیچ جریانی را در صفحه دو بعدی گرافن تحریک کند بنابراین مولفه عمودی گذردهی الکتریکی به صورت $\epsilon_{G,\perp} = 1$ در نظر گرفته می‌شود. محاسبه مؤلفه مماسی بسیار پیچیده است و به پارامترهای زیادی از قبیل فرکانس زاویه‌ای ω ، ضخامت لایه‌های گرافن d_G ، ضریب گذردهی ϵ_0 و رسانندگی سطحی گرافن $\sigma(\omega)$ بستگی دارد که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\epsilon_{G,t} = \epsilon_{G,\perp} + j \frac{\sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega d_G} \quad (2)$$

در این محاسبات $p_1 = k_{z1}/\omega\mu_0$ برای قطبش TE و $p_1 = \omega\varepsilon_0\varepsilon_1/k_{z1}$ برای قطبش TM در نظر گرفته شده است. مقدار $z = \sqrt{-1}$ است.

برای قطبش TE، $k_{x1} = k_{z1} = \sqrt{k_0^2\varepsilon_1 - k_{x1}^2}$ و $k_x = k_0\sin(\theta_0)$ مؤلفه مماسی بردار موج در هر لایه است که با موج فرودی برابر است. برای قطبش TM مقدار $k_{z1} = \sqrt{k_0^2\varepsilon_1 - k_x^2}$ است.

ماتریس انتقال برای ساختار پیشنهادی با یک لایه نقص پلیمر پلی استایرن به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} M &= (M_{SiO_2} M_G M_{Si} M_G)^{N_1} M_P (M_G M_{Si} M_G M_{SiO_2})^{N_2} \\ &= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

برای بازتاب R روابط به صورت زیر است.

$$R = |r|^2 \quad (10)$$

که

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12}p_{n+1})p_0 - m_{21} - m_{22}p_{n+1}}{(m_{11} + m_{12}p_{n+1})p_0 + m_{21} + m_{22}p_{n+1}} \quad (11)$$

در اینجا برای قطبش TE $p_0 = \left(\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}\right)\cos(\theta_0)$ و همچنین $p_{n+1} = \left(\sqrt{\mu_{n+1}/\varepsilon_{n+1}}\right)\cos(\theta_{n+1})$ برای قطبش TM و $p_0 = \left(\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}\right)/\cos(\theta_0)$ و $p_{n+1} = \left(\sqrt{\mu_{n+1}/\varepsilon_{n+1}}\right)/\cos(\theta_{n+1})$ می‌باشد. که ε_0 و ε_{n+1} به ترتیب ثابت دی الکتریک نسبی صفحات ورودی و خروجی را معرفی می‌کنند. مقدار θ_0 و θ_{n+1} به ترتیب زاویه در صفحه ورودی و خروجی است.

گرادیان خطی

هنگامی که اختلاف بین ضخامت یک لایه با لایه بعدی از همان ماده یکسان باشد، این ویژگی تحت عنوان گرادیان

رسانندگی سطحی گرافن با استفاده از مدل کوبا از مجموع دو رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\sigma(\omega) = \sigma_{intra} + \sigma_{inter} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{intra} &= j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar (\omega + j\Gamma)} \\ &\times \left(\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sigma_{inter} = j \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left(\frac{2\mu_c - (\omega + j\Gamma)}{2\mu_c + (\omega + j\Gamma)} \right) \quad (5)$$

که جرم الکترون e ، ثابت بولتزمن k_B ، دمای کلین T ، ثابت پلانک \hbar ، سرعت پراکندگی Γ و پتانسیل شیمیایی گرافن μ_c است.

در محاسبات موج فرودی می‌تواند به قطبش TE به صورت $E = (0, E_y, 0)$ و $H = (H_x, 0, H_z)$ و قطبش TM به صورت $E = (E_x, 0, E_z)$ و $H = (0, H_y, 0)$ تقسیم شود.

رابطه پاشندگی برای امواج قطبیده شده TE و TM برای گرافن ناهمسانگرد به ترتیب با روابط (۶) و (۷) بیان می‌شود.

$$K_x^2 + K_z^2 = \varepsilon_{G,t} K_0^2 \quad (6)$$

$$\frac{K_x^2}{\varepsilon_{G,\perp}} + \frac{K_z^2}{\varepsilon_{G,t}} = K_0^2 \quad (7)$$

روش ماتریس انتقال

برای ساختارهای یک بعدی از روش ماتریس انتقال برای انجام محاسبات استفاده می‌شود، زیرا به آسانی می‌تواند در هر یک از ساختارهای چند لایه پیچیده گسترش پیدا کند. این روش، محاسبات بسیار کمتری در مقایسه با روش‌های پیچیده المان محدود یا تفاضل محدود دارد.

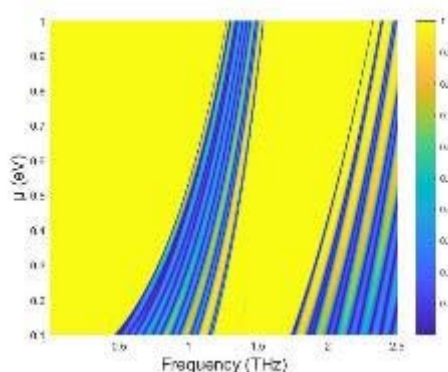
ماتریس انتقال برای لایه‌های دی الکتریک A و B و گرافن و پلیمر به ترتیب به صورت M_A و M_B و M_G و M_P در نظر گرفته می‌شود.

در اینجا M_l ماتریس انتقال هر لایه l ($l = A, B, G, P$) به صورت زیر ارائه می‌شود.

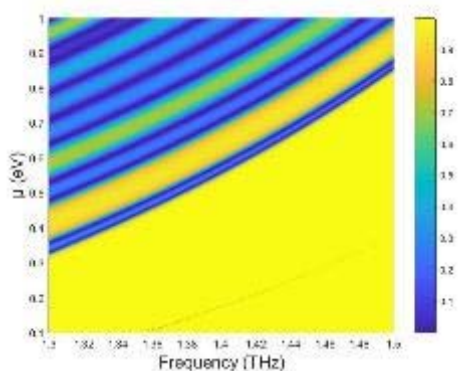
$$M_l = \begin{pmatrix} \cos(k_{z1}d_l) & -\frac{j}{p_l} \sin(k_{z1}d_l) \\ -jp_l \sin(k_{z1}d_l) & \cos(k_{z1}d_l) \end{pmatrix} \quad (8)$$

مکان مد نقص در نوار گاف فوتونی در فرکانس ۱,۳۵۶ تراهرتز قرار گرفته است.

در شکل ۳، تنظیم پذیری ساختار بلور فوتونی بر اساس تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نوار گاف فوتونی گرافنی به شدت به تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن وابسته است. با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن، پهنای نوار گاف فوتونی و همچنین پهنای نوار گاف فوتونی گرافنی افزایش یافته و به سمت فرکانس‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود. با توجه به بزرگ‌نمایی تغییرات مد نقص به وضوح دیده می‌شود که افزایش پتانسیل شیمیایی باعث جابه‌جایی مد نقص به سمت فرکانس‌های بیشتر می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۳. الف) نقشه رنگی بازتاب از ساختار فاقد گرادیان با پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت در زاویه صفر درجه، ب) بزرگ‌نمایی تغییرات مد نقص

تنظیم‌پذیری ساختار بلور فوتونی بر اساس تغییرات زاویه فرودی برای قطبش TE در شکل ۴ نشان داده شده

خطی معرفی می‌شود. در اینجا گرادیان ضخامت بر ماده با ضریب گذردهی بالاتر اعمال شده است. برای تغییرات خطی گرادیان معادله به صورت زیر معرفی می‌شود.

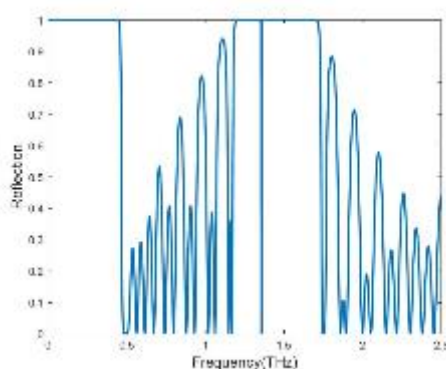
$$(d_L)_j = d_L + (j - 1)\delta d_L \quad (12)$$

با توجه به لایه‌های ساختار بلور فوتونی مقدار j از ۱ تا ۸ تغییر می‌کند و δd_L نیز اختلاف بین ضخامت لایه با ضریب گذردهی بالا از یک سلول واحد و همان لایه از سلول واحد بعدی است.

یافته‌ها

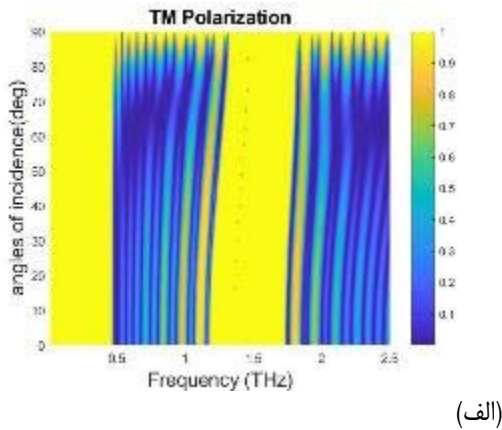
بلور فوتونی فاقد گرادیان ضخامت

ساختار بلور فوتونی گرافنی تنظیم پذیر به صورت $[P[(GBGA)^{N_2}][AGBG]^{N_1}]$ ارائه شده است. در اینجا لایه‌های A برای SiO_2 با ضریب گذردهی الکتریکی ۳,۹ و ضخامت ۲۰ میکرومتر و لایه‌های B برای Si با ضریب گذردهی الکتریکی ۱۱,۹ و ضخامت ۲۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. در این ساختار، ضخامت لایه‌های گرافن d_G برابر با ۰,۳۴ نانومتر، خواص اپتیکی گرافن Γ برابر با ۰,۱۱ مگاالکترون ولت، مقدار گذردهی الکتریکی پلیمر پلی استایرن برابر با ۲,۵ و ضخامت پلیمر d_p برابر با ۰,۵ میکرومتر، در دمای ۳۰۰ درجه کلون در نظر گرفته شده است. مقادیر N_1 و N_2 برابر با ۸ در نظر گرفته شد.

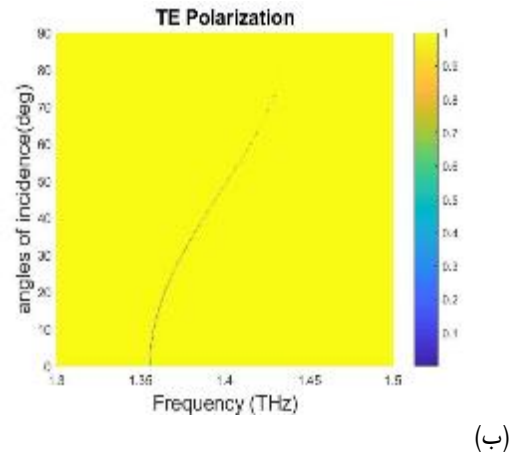
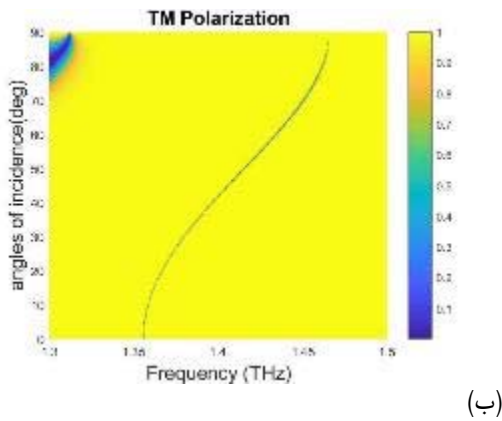
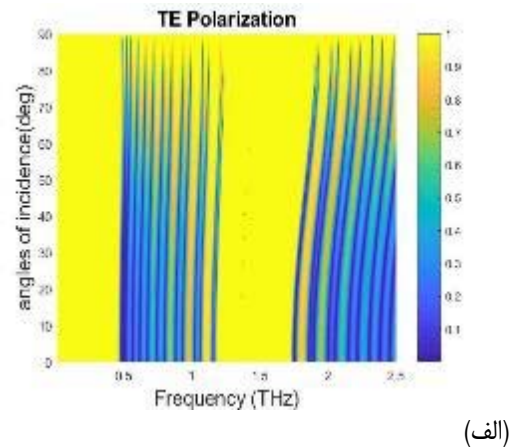


شکل ۲. طیف بازتابی از بلور فاقد گرادیان ضخامت در پتانسیل شیمیایی ۰,۱ الکترون ولت و زاویه صفر درجه

شکل ۲. طیف بازتابی از بلور فوتونی در پتانسیل شیمیایی ۰,۱ الکترون ولت و زاویه فرودی صفر درجه را نشان می‌دهد،



است. نوار گاف فوتونی گرافنی مستقل از تغییرات زاویه فرودی است. با افزایش زاویه فرودی پهنای نوار گاف فوتونی افزایش یافته و مکان مد نقص به سمت فرکانس‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود.



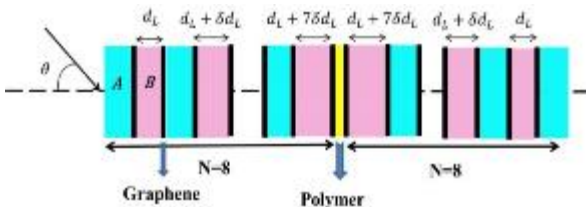
شکل ۵. الف) نقشه رنگی بازتاب از ساختار فاقد گرادیان با زاویه‌های فرودی متفاوت در پتانسیل شیمیایی گرافن برابر با ۰٫۱ الکترون ولت در قطبش TM، ب) بزرگ‌نمایی تغییرات مد نقص

شکل ۴. الف) نقشه رنگی بازتاب از ساختار فاقد گرادیان با زاویه‌های فرودی متفاوت در پتانسیل شیمیایی گرافن برابر با ۰٫۱ الکترون ولت در قطبش TE، ب) بزرگ‌نمایی تغییرات مد نقص

بلور فوتونی با گرادیان ضخامت خطی

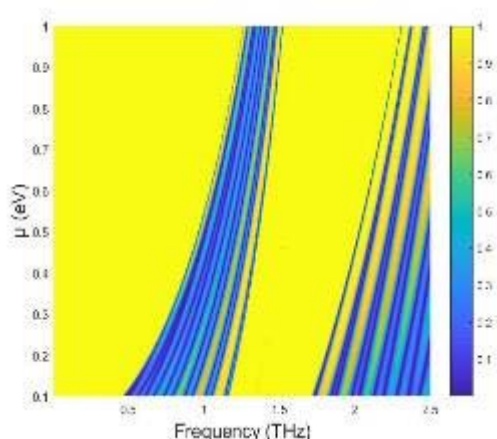
در این بخش ساختار بلور فوتونی گرافنی تنظیم‌پذیر مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شده است. گرادیان ضخامت بر لایه‌های Si اعمال شده است.

شکل ۵ نقشه رنگی بازتاب از ساختار بلور فوتونی برای زاویه‌های فرودی متفاوت در پتانسیل شیمیایی ۰٫۱ الکترون ولت برای قطبش TM را نشان می‌دهد. هنگامی که زاویه فرودی افزایش می‌یابد، مد نقص به سمت فرکانس‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود اما پهنای نوار گاف فوتونی کاهش می‌یابد.

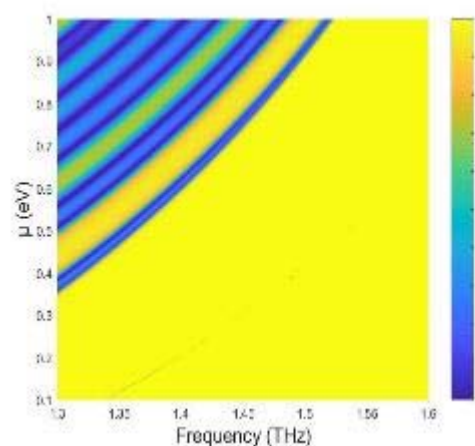


شکل ۶. ساختار بلور فوتونی گرافنی تنظیم‌پذیر با گرادیان ضخامت خطی

مدهای نقص طیفهای بازتابی ساختار بلور فوتونی با گرادیان ضخامت به سمت فرکانسهای بیشتر جابه‌جا می‌شوند.



(الف)

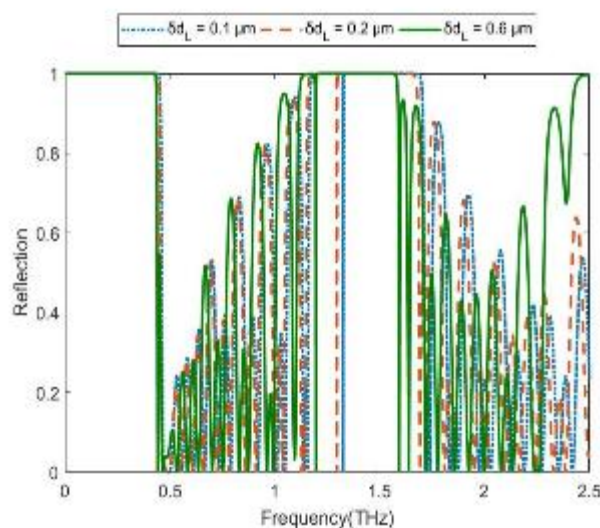


(ب)

شکل ۸. الف) نقشه رنگی بازتاب از ساختار با گرادیان ضخامت برای پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت در زاویه صفر درجه، (ب) بزرگ‌نمایی تغییرات مد نقص

طیف بازتابی ساختار بلوری با گرادیان خطی ضخامت بر حسب فرکانس و تغییرات زاویه فرودی برای دو قطبش TE و TM به ترتیب در شکل ۹ و ۱۰ رسم شده است.

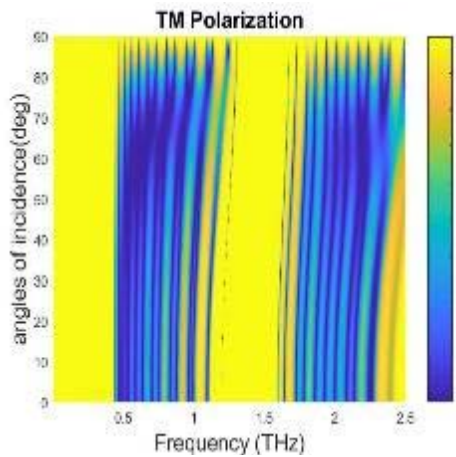
همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، طیفهای بازتابی از بلور فوتونی با گرادیان ضخامت خطی برای سه مقدار متفاوت δd_L رسم شده است. مکان مدهای نقص در نوار گاف فوتونی برای مقادیر δd_L برابر با ۰٫۱ میکرومتر، ۰٫۳ میکرومتر و ۰٫۶ میکرومتر به ترتیب در فرکانسهای ۱٫۳۲۵ تراهرتز، ۱٫۲۹۷ تراهرتز و ۱٫۱۹۵ تراهرتز ظاهر می‌شوند که نسبت به حالت فاقد گرادیان، مدهای نقص به ترتیب ۲٫۳ درصد، ۴٫۵۴ درصد و ۱۳٫۴۷ درصد به سمت فرکانسهای کمتر جابه‌جا می‌شوند.



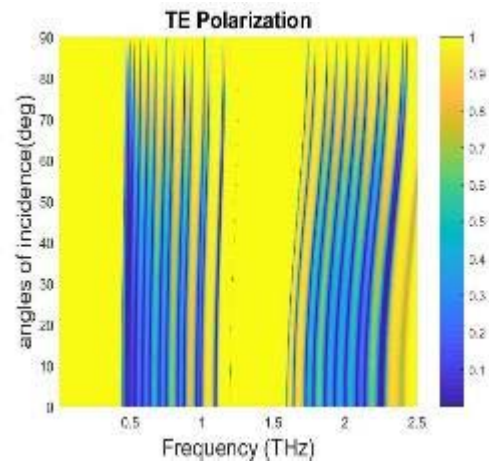
شکل ۷. طیف بازتابی از ساختار بلوری با گرادیان ضخامت برای مقادیر متفاوت δd_L در $\mu = 0.1 \text{ eV}$

در ادامه مقدار δd_L برابر با ۰٫۶ میکرومتر در نظر گرفته شده است و تنظیم پذیری ساختار بلوری با گرادیان ضخامت بر حسب تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن و زاویه فرودی بررسی شده است.

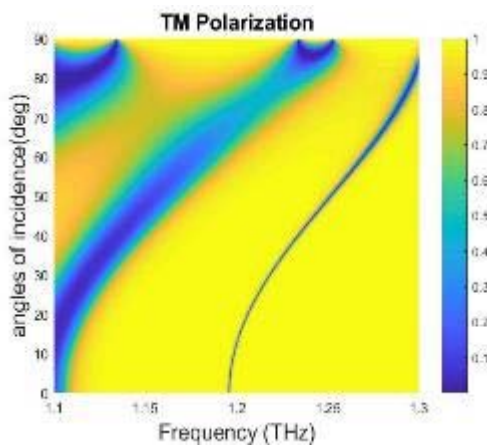
در شکل ۸ مشاهده می‌شود که پهنای نوار گاف فوتونی و پهنای نوار گاف فوتونی گرافنی به میزان قابل توجهی به تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن وابسته است و با افزایش آن به سمت فرکانسهای بیشتر جابه‌جا می‌شوند. با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن، مکان



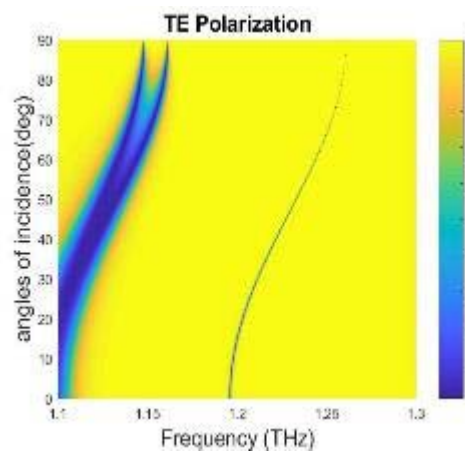
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱۰. الف) نقشه رنگی بازتاب از ساختار با لایه‌های افزایشی برای زاویه‌های فرودی متفاوت در پتانسیل شیمیایی ۰.۱ الکترون ولت و δd_L برابر با ۰.۶ میکرومتر در قطبش TM، ب) بزرگنمایی مکان مد نقص

شکل ۹. الف) نقشه رنگی بازتاب از ساختار با لایه‌های افزایشی برای زاویه‌های فرودی متفاوت در پتانسیل شیمیایی ۰.۱ الکترون ولت و δd_L برابر با ۰.۶ میکرومتر در قطبش TE، ب) بزرگنمایی مکان مد نقص

در جدول ۱ مکان مد نقص برای هر دو حالت بدون گرادیان و با گرادیان ضخامت خطی برای زوایای فرودی مختلف و پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت برای هر دو قطبش TE و TM نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن و افزایش زاویه فرودی در هر دو حالت مکان مد نقص به سمت فرکانس‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود. مقادیر برای قطبش TE و TM در زاویه صفر درجه با هم برابرند. مکان مد نقص در حالت با گرادیان ضخامت در فرکانس کمتری نسبت به حالت بدون گرادیان ظاهر می‌شود.

برای هر دو قطبش به وضوح مشاهده می‌شود که مکان مدهای نقص هنگامی که زاویه فرودی افزایش می‌یابد به سمت فرکانس‌های بیشتر جابه‌جا می‌شوند. با افزایش زاویه فرودی، برای قطبش TE بر پهنای نوار گاف فوتونی افزوده می‌شود، در حالی که در قطبش TM از پهنای نوار گاف فوتونی کاسته می‌شود.

جدول ۱. مکان مد نقص بازتابی مربوط به هر دو ساختار بدون گرادیان و با گرادیان ضخامت خطی بر حسب فرکانس تراهرتز در پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت و زاویه‌های فرودی مختلف

مکان مد نقص با گرادیان (تراهرتز)		مکان مد نقص بدون گرادیان (تراهرتز)		پتانسیل شیمیایی گرافن (الکترون ولت)	زاویه فرودی (درجه)
TM	TE	TM	TE		
۱/۱۹۵	۱/۱۹۵	۱/۳۳۵	۱/۳۳۵	۰/۱	
۱/۲۸۷	۱/۲۸۷	۱/۴۶۵	۱/۴۶۵	۰/۳	۰
۱/۳۵۶	۱/۳۵۶	۱/۵۵۲	۱/۵۵۲	۰/۵	
۱/۲۱۷	۱/۲۱۰	۱/۳۸۰	۱/۳۷۵	۰/۱	
۱/۳۰۶	۱/۳۰۳	۱/۴۸۷	۱/۴۸۵	۰/۳	۳۰
۱/۳۷۴	۱/۳۷۳	۱/۵۷۲	۱/۵۷۳	۰/۵	
۱/۲۴۲	۱/۲۲۷	۱/۴۰۵	۱/۳۹۴	۰/۱	
۱/۳۲۷	۱/۳۲۰	۱/۵۱۰	۱/۵۰۶	۰/۳	۴۵
۱/۳۹۳	۱/۳۹۰	۱/۵۹۴	۱/۵۹۴	۰/۵	
۱/۲۶۸	۱/۲۴۴	۱/۴۳۴	۱/۴۱۵	۰/۱	
۱/۳۵۰	۱/۳۳۷	۱/۵۳۶	۱/۵۲۸	۰/۳	۶۰
۱/۴۱۴	۱/۴۰۷	۱/۶۱۷	۱/۶۱۶	۰/۵	

جدول ۲. ارتفاع مد نقص بازتابی مربوط به هر دو ساختار بدون گرادیان و با گرادیان ضخامت خطی در پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت و زاویه‌های فرودی مختلف

ارتفاع مد نقص با گرادیان		ارتفاع مد نقص بدون گرادیان		پتانسیل شیمیایی گرافن (الکترون ولت)	زاویه فرودی (درجه)
TM	TE	TM	TE		
۱	۱	۱	۱	۰/۱	
۱	۱	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۳	۰
۱	۱	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۵	
۱	۱	۱	۰/۹۸	۰/۱	
۱	۱	۱	۰/۹۰	۰/۳	۳۰
۱	۱	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۵	
۱	۱	۱	۰/۹۷	۰/۱	
۱	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۷۲	۰/۳	۴۵
۱	۰/۹۵	۰/۳۶	۰/۰۴	۰/۵	
۱	۱	۱	۰/۹۶	۰/۱	
۱	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۴۸	۰/۳	۶۰
۱	۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۰۲	۰/۵	

کاهش ارتفاع بسیار اندک است. برای حالت با گرادیان خطی مشاهده می‌شود که در قطبش TM مد نقص کامل است و در قطبش TE در زاویه‌های فرودی بیشتر از ۴۵ درجه و پتانسیل‌های شیمیایی بالا اندکی ارتفاع مد نقص کاهش می‌یابد.

جدول ۳ تغییرات پهنای نوار گاف فوتونی را نشان می‌دهد. در هر دو حالت بدون گرادیان و با گرادیان برای

تغییرات ارتفاع مد نقص برای حالت با گرادیان و بدون گرادیان در جدول ۲ نشان داده شده است. برای حالت بدون گرادیان، در یک زاویه ثابت با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن از ارتفاع مد نقص کاسته می‌شود. برای قطبش TE میزان کاهش ارتفاع بسیار زیاد است به طوری که بعد از پتانسیل شیمیایی ۰.۵ الکترون ولت مد نقص کاملاً ناپدید می‌شود. برای قطبش TE میزان

جدول ۳. پهنای نوار گاف فوتونی مربوط به هر دو ساختار بدون گرادیان و با گرادیان ضخامت خطی در پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت و زاویه‌های فرودی مختلف

پهنای نوار گاف فوتونی بدون گرادیان (تراهرتز)		پهنای نوار گاف فوتونی با گرادیان (تراهرتز)		پتانسیل شیمیایی گرافن (الکترون ولت)	زاویه فرودی (درجه)
TM	TE	TM	TE		
۰/۴۵۶	۰/۴۵۶	۰/۵۳۲	۰/۵۳۲	۰/۱	
۰/۵۳۱	۰/۵۳۱	۰/۵۹۰	۰/۵۹۰	۰/۳	۰
۰/۵۹۹	۰/۵۹۹	۰/۶۴۶	۰/۶۴۶	۰/۵	
۰/۴۴۷	۰/۴۷۷	۰/۵۱۴	۰/۵۵۶	۰/۱	
۰/۵۲۵	۰/۵۵۱	۰/۵۸۴	۰/۶۱۷	۰/۳	۳۰
۰/۵۹۱	۰/۶۲۱	۰/۶۴۵	۰/۶۴۷	۰/۵	
۰/۴۳۸	۰/۴۹۸	۰/۵۰۰	۰/۵۸۳	۰/۱	
۰/۵۱۷	۰/۵۷۹	۰/۵۷۷	۰/۶۴۹	۰/۳	۴۵
۰/۵۸۲	۰/۶۴۳	۰/۶۳۸	۰/۷۰۸	۰/۵	
۰/۴۲۱	۰/۵۲۱	۰/۴۸۶	۰/۶۱۵	۰/۱	
۰/۵۰۱	۰/۶۰۶	۰/۵۶۲	۰/۶۸۱	۰/۳	۶۰
۰/۵۷۱	۰/۶۷۵	۰/۶۳۳	۰/۷۴۸	۰/۵	

بحث و نتیجه‌گیری

خواص اپتیکی دو ساختار بلور فوتونی گرافنی یک‌بعدی، بدون گرادیان و با گرادیان ضخامت خطی با جزئیات در محدوده ۰,۳ تا ۲,۵ تراهرتز بررسی شد. تنظیم‌پذیری مکان مدهای نقص، نوار گاف فوتونی و نوار گاف فوتونی گرافنی بر حسب تغییرات پتانسیل شیمیایی گرافن و زاویه موج فرودی در هر دو قطبش TE و TM مورد مطالعه قرار گرفت. با اعمال گرادیان ضخامت، مکان مد نقص در مقایسه با حالت بدون گرادیان در فرکانس‌های کمتر ظاهر می‌شود و با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن و زاویه موج فرودی ارتفاع مد نقص کمتر کاهش می‌یابد. افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن و زاویه موج فرودی باعث می‌شود که مکان مد نقص در هر دو ساختار به سمت فرکانس‌های بیشتر جابه‌جا شود. از این دو ساختار می‌توان در طراحی فیلترهای تنظیم‌پذیر برای محدوده تراهرتز پایین استفاده کرد.

قطبش TE در یک پتانسیل شیمیایی ثابت پهنای نوار گاف فوتونی با افزایش زاویه فرودی افزایش می‌یابد، در حالی که برای قطبش TM پهنای نوار گاف فوتونی کاهش می‌یابد.

در حالت بدون گرادیان، در پتانسیل شیمیایی ۰,۱ الکترون ولت بین زاویه صفر تا ۶۰ درجه پهنای نوار گاف فوتونی ۹,۴۶٪ کاهش می‌یابد در حالی که برای پتانسیل شیمیایی ۰,۵ الکترون ولت این کاهش پهنای ۲,۰۵٪ است. در حالت با گرادیان ضخامت خطی، در پتانسیل شیمیایی ۰,۱ الکترون ولت پهنای نوار گاف فوتونی بین زاویه صفر تا ۶۰ درجه ۸,۳۱٪ کاهش می‌یابد، در حالی که برای پتانسیل شیمیایی ۰,۵ الکترون ولت پهنای نوار گاف فوتونی به میزان ۳,۴۱٪ کاهش می‌یابد.

References

- [1] E. Yablonovitch, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2059-2062
- [2] S. John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 2486-2489.
- [3] F. Segovia-Chaves, H. Vinck-Posada, Tuning of transmittance spectrum in a one-dimensional superconductor-semiconductor photonic crystal, *Physica B* 543 (2018) 7-13.
- [4] Y. Liu, S.-Q. Xu, M. Liu, X.-G. Hu, Y.-F. Duan, L. Yi, Tunable multi-band terahertz absorber based on a one-dimensional heterostructure containing semiconductor, *Optik* 170 (2018) 203-209
- [5] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, Photonic crystals: Putting a new twist on light, *Nature* 386 (1997) 143-149.
- [6] J. D. Joannopoulos et al., Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Princeton University Press, New Jersey, 2011.
- [7] J. Fu, W. Chen, B. Lv, Tunable defect mode realized by graphene-based photonic crystal, *Phys. Lett. A* 380 (2016) 1793-1798.
- [8] D.M. El-Amassi, S.A. Taya, N.R. Ramanujam, D. Vigneswaran, R. Udaiyakumar, Extension of energy band gap in ternary photonic crystal using left-handed materials, *Superlattice Microst.* 120 (2018) 353-362.
- [9] O. Soltani, J. Zaghoudi, M. Kanzari, High quality factor polychromatic filters based on hybrid photonic structures, *Chinese J. Phys.* 56 (2018) 2479-2487.
- [10] M. Tokushima, H. Kosaka, A. Tomita, H. Yamada, Lightwave propagation through a 120 sharply bent single-line-defect photonic crystal waveguide. *Appl. Phys. Lett.* 76 (2000) 952-955.
- [11] K.V. Sreekanth, S. Zeng, K.-T. Yong, T. Yu, Sensitivity enhanced biosensor using graphene-based one-dimensional photonic Crystal, *Sensors and Actuators B* 182 (2013) 424-428.
- [12] F. Segovia-Chaves, H. Vinck-Posada, Dependence of the defect mode with temperature, pressure and angle of incidence in a 1D semiconductor-superconductor photonic crystal, *Physica C: Superconductivity and its Applications* 553 (2018) 1-7.
- [13] Y. Trabelsi, N.B. Ali, M. Kanzari, Tunable narrowband optical filters using superconductor dielectric generalized Thue-Morse photonic crystals, *Microelectron. Eng.* 213 (2019) 41-46.
- [14] H. Mahmoodzadeh, B. Rezaei, Tunable Bragg defect mode in one-dimensional photonic crystal containing a graphene embedded defect layer, *Appl. Opt.* 57 (2018) 2172.
- [15] C. Nayak, A. Aghajamali, M. Solaimani, J.K. Rakshit, D. Panigrahy, K.V.P. Kumar, B. Ramakrishna, Dodecanacci superconductor metamaterial photonic quasicrystal, *Optik* 222 (2020) 165290. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165290>.
- [16] H.-C. Hung, C.-J. Wu, S.-J. Chang, Terahertz temperature-dependent defect mode in a semiconductor-dielectric photonic crystal, *J. Appl. Phys.* 110 (2011) 093110.
- [17] V. Pourmahmoud, B. Rezaei, Manipulation of Bragg and graphene photonic band gaps in one-dimensional photonic crystal containing graphene, *Optik* 185 (2019) 875-880.
- [18] L. Bian, Z. Deng, Y. Hong, Y. Qiu, Z. Liu, P. Xiao, G. Li, Double mode absorption in double defect photonic crystal with one graphene multilayer, *Opt. Quant. Electron* 52,154 (2020) <https://doi.org/10.1007/s11082-020-2255-4>.
- [19] W. Belhadj, Properties of omnidirectional gap and defect mode of one di-

mensional grapheme dielectric periodic structures, *Opt. Quant. Electron* 52, 162 (2020)
<https://doi.org/10.1007/s11082-020-02267-y>.

[20] Y. Li, L. Qi, J. Yu, Z. Chen, Y. Yao, YAO, X. Liu, One-dimensional multi-band terahertz graphene photonic crystal filters, *Opt. Mater. Express*. 7 (2017) 1228-1239.