بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تأثیر جایگاه نقص در بلور فوتونی یک بعدی گرافن پایه بر جذب نوری

آرزو رشیدی[۱]، عبدالرحمن نامدار[۱] و رضا عبدی قلعه[۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

[۲]گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

چکیده – در این مقاله اثر تعداد تناوب سلول‌های واحد اطراف لایه‌ی نقص در یک بلور فوتونی یک بعدی گرافن پایه را بر طیف جذب بررسی می‌کنیم. با فرض اینکه تعداد تناوب سلول واحد قبل و بعد از لایه‌ی نقص به ترتیب m و n باشد، نشان می‌دهیم که در هر m با افزایش n، جذب در محل مد نقص رو به بهبود می‌گذارد. بعلاوه، برای دست‌یابی به جذب افزایش یافته در ساختار، علاوه بر n های بالاتر بایستی از m های پایین نیز استفاده کرد.

کلید واژه- بلور فوتونی یک بعدی گرافن پایه، جذب افزایش‌یافته، مد نقص

Effect of Defect Position on Optical Absorption in a Graphene-Based One-Dimensional Photonic Crystal

Arezou Rashidi[1], Abdolrahman Namdar[1] and Reza Abdi-Ghaleh[2]

[1]Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz

[2]Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab

Abstract- In this paper, we investigate the effect of period numbers of unit cells surronding a defect layer on absorption spectra in a graphene-based one-dimensional photonic crystal. Assuming the period numbers of unit cells before and after the defect layer m and n, respectively, it is shown that the absorption tends to be improved by increasing n for each m, at the position of defect mode. Moreover, achieving enhanced absorption in the structure requires the use of low m besides higher n.

Keywords: Graphene-Based One-Dimensional Photonic Crystal, Enhanced Absorption, Defect Mode

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

۱- مقدمه

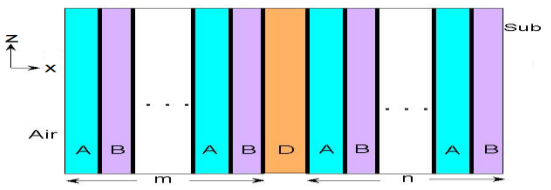
بلورهای فوتونی، محیط‌هایی با خواص نوری متناوب هستند که بخاطر توانایی منحصر به فردشان در کنترل و دستکاری نور، از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند [۱]. به هم خوردن تقارن انتقالی یا تناوب ساختاری در بلورهای فوتونی موجب ظهور مد نقص در گاف باند فوتونی می‌شود که می‌تواند کنترل-پذیری را برای آن فراهم آورد.

از طرف دیگر، گرافن –ورقی با ضخامت یک اتم از گرافیت- بدلیل خواص الکترونیکی و فوتونی خارق‌العاده‌اش که به سختی در سایر مواد یافت می‌شود، مطالعات علمی گسترده-ای را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. گرافن تک‌لایه‌ی غیر آلاییده در منطقه‌ی مادون قرمز نزدیک دارای جذب نوری بسیار ضعیفی است (٪ ۲,۳) که کاربردهای بالقوه‌ی آن را در ابزارهایی مانند آشکارسازهای نوری، فوتو ولتائیک‌ها و ... محدود می‌کند. در این راستا، محققان در طی سال‌های اخیر، با استفاده از ساختارهای مختلف شامل گرافن، مطالعاتی را در جهت افزایش جذب آن انجام داده‌اند. برای نمونه می‌توان به مراجع [۳-۶] اشاره کرد.

در این مقاله، ساختار ما شامل یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی لایه‌ی نقص است که در آن تک لایه‌های گرافن در مرز بین لایه‌های دی‌الکتریک مجاور قرار گرفته‌اند. هدف ما این است که با تغییر تعداد تناوب سلول‌های واحد در طرفین لایه‌ی نقص، به بررسی امکان کوک‌پذیری جذب در ناحیه طول موجی مادون قرمز نزدیک بپردازیم و با توجه به آن حالتی را که در آن جذب افزایش یافته‌ای در ساختار مورد نظر حاصل می‌شود، شناسایی کنیم.

۲- مدل و فرمولبندی مسئله

نمایشی از ساختار مورد مطالعه‌مان در شکل ۱ نمایش داده شده است که در آن لایه‌های A، B و D به ترتیب نمایشگر مواد تیتانیم دی اکسید، سیلیکا و لیتیم نیوبات با ضرایب شکست n_a=2.17، n_b=1.45 و $n_d=n_e(\lambda)$ می‌باشند. این لایه-ها توسط نانو لایه‌های گرافنی با رسانندگی σ_g از یکدیگر جدا شده‌اند. با فرض طول موج طراحی $\lambda_0 = 1.35\,\mu m$، ضخامت لایه‌های A و B را به صورت ربع طول موج و ضخامت لایه‌ی D را برابر با $\lambda_0/3$



شکل ۱: طرحواره‌ی ساختار مورد مطالعه به صورت Air/(AGBG)^{m}D(GAGB)^n/Sub.

انتخاب می‌کنیم. در مورد لایه‌ی نقص D که یک ماده‌ی فروالکتریک از جنس لیتیم نیوبات ($LiNbO_3$) می‌باشد، ضریب شکست به طول موج وابسته است (پاشنده) که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$n_d = (4.5820 - \frac{0.099169}{0.044432 - \lambda^2} - 0.021950\,\lambda^2)^{1/2}. \quad (۱)$$

لازم به ذکر است که $LiNbO_3$ یک بلور تک محوری منفی است و تقارن بلوری 3m دارد. اگر حالتی را در نظر بگیریم که نور در راستای محور x منتشر و در مسیر z (محور نوری) قطبیده شود، در این صورت ضریب شکست مربوطه، قطبش غیر عادی (n_e) را تجربه خواهد کرد. در مورد گرافن نیز رسانندگی نوری مطابق با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$\sigma(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar}\left[\begin{array}{l} \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\tan^{1-}\frac{x}{2k_BT} + \frac{i}{2\pi}\{\frac{16k_BT}{\hbar\omega} \\ \times\ln(2\cosh\frac{\mu_c}{2k_BT}) - \ln\frac{y^2}{x^2+(2k_BT)^2}\} \end{array}\right], \quad (۲)$$

که $x = \hbar\omega - 2\mu_c$ و $y = \hbar\omega + 2\mu_c$ می‌باشد. در رابطه‌ی فوق e بار الکترون، $\hbar$ ثابت پلانک، k_B ثابت بولتزمن، T دما بر حسب K، ω فرکانس زاویه‌ای موج تابشی و μ_c نیز پتانسیل شیمیایی گرافن می‌باشد. اکنون، با در دست داشتن پارامترهای فوق، با استفاده از روش ماتریس انتقال (که به تفصیل در مرجع ۸ ذکر شده است)، جذب نوری را در ساختار مورد نظر محاسبه می‌کنیم. مطابق با این روش، جذب در لایه‌ی l ام (A_l) عبارت است از:

$$A_l = \frac{[S_{(l-1)i} - S_{(l-1)o}] + [S_{(l+1)i} - S_{(l+1)o}]}{S_{ai}}. \quad (۳)$$

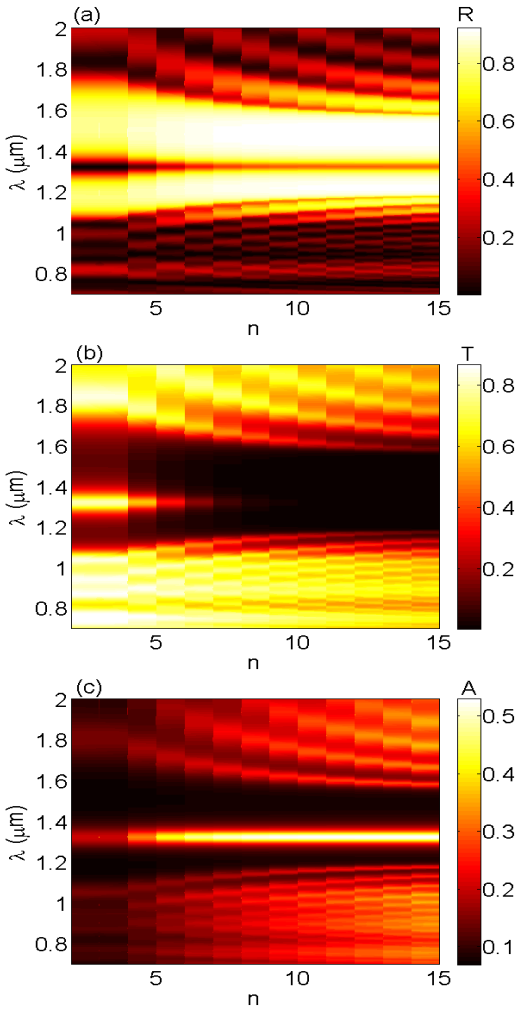
در اینجا، S بردار پوئین تینگ و اندیس‌های i و o به ترتیب به امواج نور فرودی و خروجی اشاره دارند. همچنین، اندیس-های $(l-1)/(l+1)$ و a به ترتیب لایه-ی $(l-1)/(l+1)$ ام و محیط فرودی (هوا) را بیان می‌کنند.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

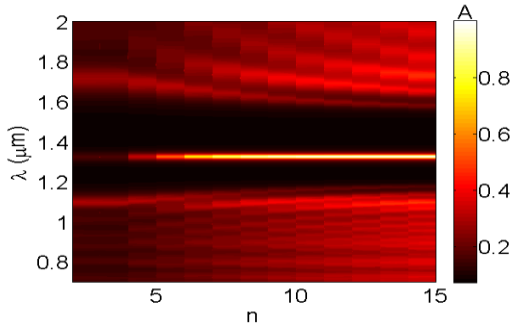
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

۳- بحث و بررسی

در این مقاله، تعداد تناوب سلول واحد سمت چپ لایه‌ی نقص را m و تعداد تناوب سلول واحد سمت راست آن را برابر با n در نظر می‌گیریم (شکل ۱). همچنین، فرض می‌کنیم که پتانسیل شیمیایی ورقه‌های گرافن برابر با $\mu_c = 0.2ev$ است و محاسبات را در دمای 20^{0C} انجام می‌دهیم. شکل ۲، طیف بازتابندگی، تراگسیلندگی و جذب نوری ساختار مذکور را در صفحه‌ی $\lambda - n$ به ازای $m=3$ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل هم پیدا است، ماکزیمم جذب ساختار، حدوداً ۵۰٪ است که برای $n>6$ و در ناحیه‌ی تشکیل گاف باند و در محل مد



شکل ۲: طیف بازتابندگی (a)، تراگسیلندگی (b) و جذب (c) در صفحه‌ی $\lambda - n$ برای m=3. در اینجا $\mu_c = 0.2ev$ و $T = 20^{0C}$ می‌باشند.

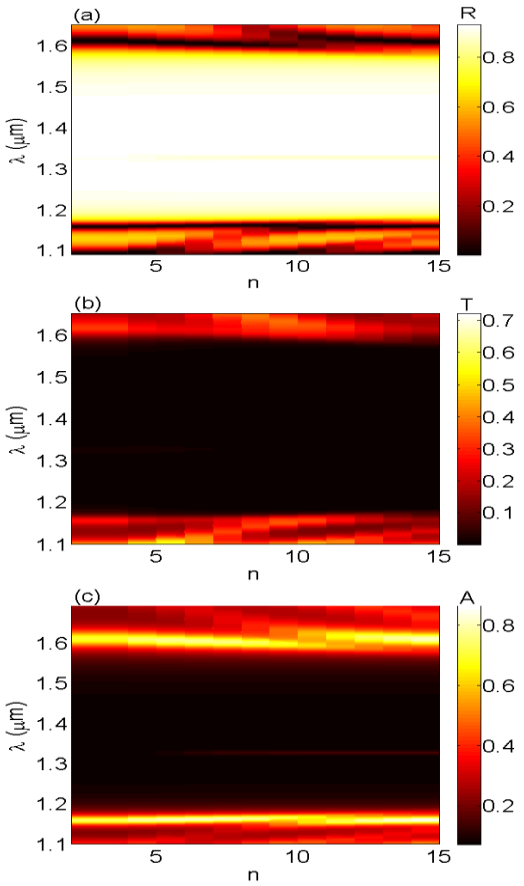


شکل ۳: طیف جذب در صفحه‌ی $\lambda - n$ برای m=5. در اینجا $\mu_c = 0.2ev$ و $T = 20^{0C}$ می‌باشند.

نقص، در طول موج $\lambda_p \approx 1.322\mu m$ ظاهر شده است. لازم به ذکر است که ما توجهمان را به ناحیه‌ی تشکیل گاف باند معطوف می‌کنیم که به دلیل نقص‌دار بودن ساختار، مد نقص در داخل گاف باند ظاهر می‌شود. هدفمان این است که جذب حاصله را برای m و n های مختلف بررسی کنیم. شکل ۳، جذب نوری ساختار را در $m=5$ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در n های بالاتر، جذب افزایش یافته‌ای در حدود ۹۰٪ و حتی نزدیک به یک حاصل می‌شود. محل قله‌ی جذب نیز $\lambda_p \approx 1.325\mu m$ است. برای بررسی بیشتر، m را افزایش داده و به ۱۰ می‌رسانیم (شکل ۴). با توجه به شکل ۴(a) که طیف بازتابندگی را در ناحیه‌ی اطراف گاف باند نشان می‌دهد، مد نقص نسبتا کم پیدا است با بازتابندگی‌ای که بالا و در حدود ۰٫۸ است. همچنین، مطابق با شکل ۴(b)، تراگسیلندگی نیز در این ناحیه بسیار پایین و نزدیک به صفر است. بنابراین، انتظار داریم که جذب بسیار پایینی را در محل مد نقص مشاهده کنیم (شکل ۴(c) را ملاحظه کنید). به عبارت دیگر، جذب در m های بالاتر در محل مد نقص به شدت کاهش یافته است. در حالی‌که، مطابق با آنچه که در نمودار ۳ دیدیم، در m های پایین (m=5) و n های بالاتر ($n>9$) جذب افزایش یافته‌ای حاصل می‌شود. همچنین، طول موج قله‌ی جذب (در محل مد نقص) مطابق با شکل‌های فوق تقریبا ثابت باقی می‌ماند و در حدود $1.32\mu m$ می‌باشد. اما، دلیل فیزیکی افزایش قله‌ی جذب در n های بالاتر و m های پایین‌تر، بستگی بازتاب نور به تعداد لایه‌ها در بلورهای فوتونی می‌باشد. همانطور که می‌دانیم، هر چه تعداد تناوب سلول واحد در بلورهای فوتونی افزایش یابد، بازتاب نیز افزایش می‌یابد؛

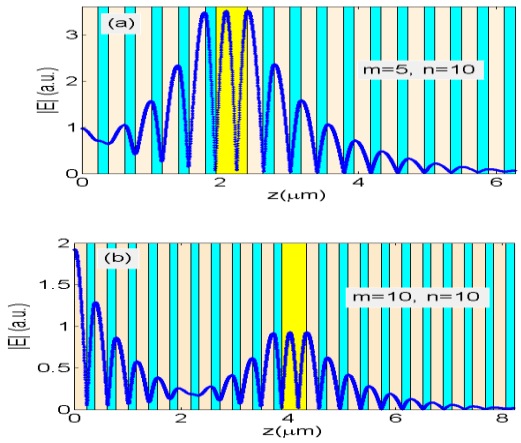
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]



شکل ۴: طیف بازتابندگی (a)، تراگسیلندگی (b) و جذب (c) در صفحه‌ی $\lambda - n$ برای m=10. در اینجا $\mu_c = 0.2\,ev$ و $T = 20^{0C}$ می‌باشند.

طوری‌که برای نوری که از سمت چپ بر ساختار پیشنهادی می‌تابد، با افزایش m، بدلیل افزایش بازتاب نور ورودی، انتشار نور از ورقه‌های گرافن کمتر شده و بنابراین، جذب نیز کاهش می‌یابد. حال آنکه نور انتشار یافته از ساختار در مواجهه با بلور گرافن‌دار سمت راست لایه‌ی نقص با n بالاتر، بخاطر افزایش بازتاب، مجددا از ورقه‌های گرافن عبور می‌کند. لذا، رفت و برگشت بالای نور از ورقه‌های گرافن صورت می‌گیرد. از طرفی، همانطور که گفتیم، ساختار ما حاوی نقص است که موجب تشکیل مد نقص می‌شود و بنابراین، به دلیل افزایش جایگزیدگی میدان در اطراف لایه‌ی نقص، جذب افزایش یافته‌ای حاصل می‌شود. شکل ۵ که پروفایل میدان را برای دو حالت m=5, n=10 (a) و m=10, n=10 (b)، در طول موج قله (طول موج مربوط به مد نقص) $\lambda_p = 1.326\,\mu m$ نشان می‌دهد، مؤید این است که در حالت اول جایگزیدگی در اطراف لایه‌ی نقص بالا و بنابراین، جذب افزایش یافته‌ای در ساختار حاصل می‌شود.



شکل ۵: توزیع میدان الکتریکی در $\lambda_p = 1.326\,\mu m$. (a): $m = 5, n = 10$ و (b): $m = 10, n = 10$ را نشان می‌دهند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر تغییر تعداد تناوب سلول‌های واحد اطراف لایه‌ی نقص بر جذب نوری، در بلور فوتونی یک بعدی گرافن پایه بررسی شد. نشان داده شد که با تغییر تعداد تناوب سلول‌های واحد، جذب ساختار در محل مد نقص تغییر می‌کند؛ طوری‌که با انتخاب خاص تناوب سلول‌های واحد، امکان دست‌یابی به جذب افزایش یافته‌ای در حدود ٪ ۹۰ و حتی نزدیک به یک نیز وجود دارد.

مراجع

[1] J. D. Joannopoulos, J. N. Winn and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Ligh*, Princeton University Press, 2008.

[2] L. A. Falkovsky, "Optical properties of graphene", *J. Phys. : Conference series*, Vol. 129, No. 1, pp. 012004-012010, 2008.

[3] J.-T. Liu, N.-H. Liu, J. Li, X. J. Li, J.-H. Huang, "Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 101, No. 5, pp. 052104-052107, 2012.

[4] M. Furchi, A. Urich, A. Pospischil, G. Lilley, K. Unterrainer, H. Detz, P. Klang, A. M. Andrews, W. Schrenk, G. Strasser, T. Muller, "Microcavity-integrated graphene photodetector", *Nano. Lett.*, Vol. 12, No. 6, pp. 2773-2777, 2012.

[5] X. Gan, K. F. Mak, Y. Gao, Y. You, F. Hatami, J. Hone, T. F. Heinz, D. Englund, "Strong enhancement of light-matter interaction in graphene coupled to a photonic crystal nanocavity", *Nano. Lett.*, Vol. 12, No. 11, pp. 5626-5631, 2012.

[6] Y. Liu, A. Chadha, D. Zhao, J. R. Piper, Y. Jia, Y. Shuai, L. Menon, H. Yang, Z. Ma, Sh. Fan, F. Xia, W. Zhou, "Approaching total absorption at near infrared in a long area monolayer graphene by critical coupling", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 105, No. 18, pp. 181105-181108, 2014.

[7] D. S. Smith, H. D. Riccius, "Refractive indices of lithium niobate", *Opt. Commun.*, Vol. 17, No. 3, pp. 332-335, 1976.

[8] X.-H. Deng, J.-T. Liu, J.-R. Yuan, Q.-H. Liao, N.-H. Liu, " A new transfer matrix method to calculate the optical absorption of graphene at any position in stratified media", *Europhys. Lett.*, Vol. 109, No. 2, pp. 27002-27007, 2015.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]