

تنظیم ضریب جذب غیرخطی بلور فوتونی یک بعدی شامل نقص لایه گرافن

انسیه محبی¹، نرگس انصاری^{2*}، فاطمه شهشاهانی³

1. دانشجوی کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه الزهرا

2. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه الزهرا

3. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه الزهرا

تاریخ دریافت: 96/05/08 تاریخ پذیرش: 96/06/15

Control of Nonlinear Optical Absorption in One-Dimensional Photonic Crystal with Graphene Defect

E. Mohebbi¹, N. Ansari^{2*}, F. Shahshahani³

1. M.Sc, Physics, Alzahra University, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran

Received: 2017-07-30 Accepted: 2017-09-06

Abstract

Today, graphene nanostructures have made potential application in nonlinear optoelectronic devices, e.g. in narrowband filters. In this paper, the nonlinear absorption of one-dimensional defective photonic crystal made of Ta₂O₅ and SiO₂ periodic layers and graphene layer as a structural defect showing nonlinear optical properties are investigated in the visible wavelength region using the transfer matrix method (TMM). Due to the high third-order nonlinear susceptibility of the graphene layer, the optical Kerr effect is found to be a dominant effect in the studied structure. Results indicate that the absorption response of the structure is tuneable through the changes in periodicity, polarization and angle and amplitude of incident. Calculation results show that it is possible to achieve two absorption values of 0.99 with an incident amplitude of less than 10² MW/cm² and zero with incident amplitude higher than 10⁴ MW/cm², an incident wavelength of 818 nm.

Keywords

Kerr Effect, Photonic Crystal, Third Order Nonlinear, Transfer Matrix Method, Nonlinear Absorption, Graphene.

چکیده

امروزه نانوساختارهای گرافن استعداد چشمگیری برای استفاده در کاربردهای اپتوالکترونیک غیرخطی مانند فیلترهای باندگذر باریک از خود نشان داده‌اند. در این مقاله، میزان جذب غیرخطی بلور فوتونی یک بعدی شامل لایه‌های دی‌الکتریک Ta₂O₅ و SiO₂ و لایه گرافن به عنوان نقص ساختار که دارای خاصیت غیرخطی نوری است، از جنبه نظری بررسی شده است. به دلیل پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم قوی گرافن، اثر اپتیکی کر یکی از اثرات غالب در ساختار مورد مطالعه است. نتایج مطالعات نظری حاکی از آن است که میزان جذب ساختار با تغییر دوره تناوب، قطبش، زاویه فرود و شدت نور فرودی تنظیم‌پذیر است. محاسبات نشان می‌دهد که در طول موج 818 نانومتر می‌توان به دو مقدر جذب 0/99 و صفر به ترتیب در شدت‌های کمتر از 10² MW/cm² و در شدت‌های بالاتر از 10⁴ MW/cm² دست یافت. بررسی نظری ساختار در ناحیه طول موج مرئی با روش ماتریس انتقال، TMM، انجام شده است.

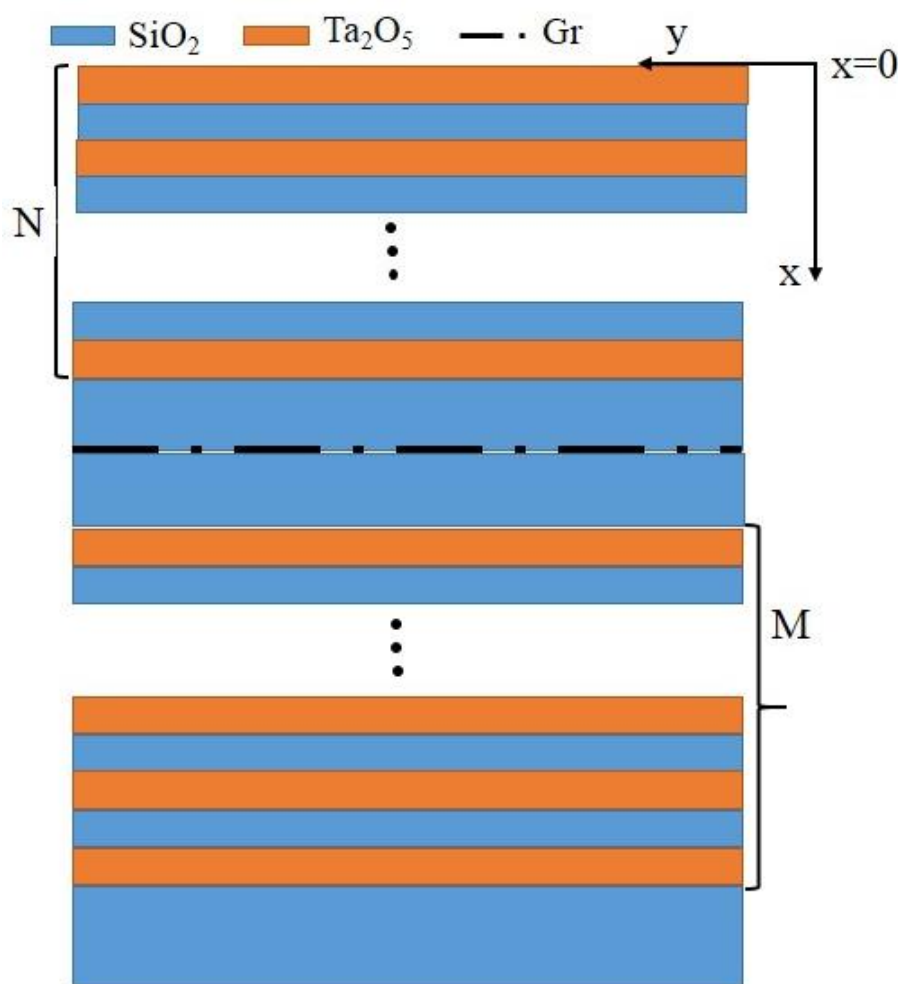
واژگان کلیدی

اثر کر، بلور فوتونی، پذیرفتاری مرتبه سوم، روش ماتریس انتقال، جذب غیرخطی، گرافن.

مقدمه

امروزه، نانوساختارهایی که توانایی جذب بالای نور را دارند برای کاربردهای غیرخطی اپتوالکترونیک بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [1-3]. مواد تک لایه دوبعدی، مواد نوینی هستند که به عنوان لایه‌های فعال در دستگاه‌های با جذب کنندگی بالا استفاده قرار می‌شوند [4]. یکی از این نانوساختارهای دوبعدی، تک لایه گرافن است که در سال‌های اخیر به علت خواص منحصر به فرد الکترونیک و

که در نتیجه، پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم آن صفر و دارای خواص غیرخطی قوی مرتبه سوم است [5-7]. اندازه ضریب پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم گرافن، به طور تجربی، با استفاده از روش $-z$ اسکن از مرتبه $10^{13} \text{ m}^2/\text{n}^2$ و با روش چهار موج از مرتبه $10^{16} \text{ m}^2/\text{n}^2$ - 10^{15} به دست آمده است [8-10]. اثر قوی غیرخطی مرتبه سوم دلیل مشاهده اثر کر در گرافن است [10-12].



شکل 1. ساختار هوا / $\{(b/a)^N D/Gr/D (a/b)^M\}$ زیرلایه که a, b, D و Gr به ترتیب $\text{SiO}_2, \text{Ta}_2\text{O}_5, \text{SiO}_2$ و گرافن است.

ضخامت تک لایه گرافن $0/34$ نانومتر است که به دلیل ضخامت کم، میزان جذب آن در ناحیه مرئی پایین است. تک لایه گرافن در ناحیه طول موج مرئی فاقد گاف نواری

اپتیکی، در زمینه‌های گوناگون از جمله فیزیک، فوتونیک، شیمی و الکترونیک اهمیت بسیار یافته است. ساختار گرافن در گروه نقطه‌ای D_{6h} قرار دارد و دارای تقارن وارون است

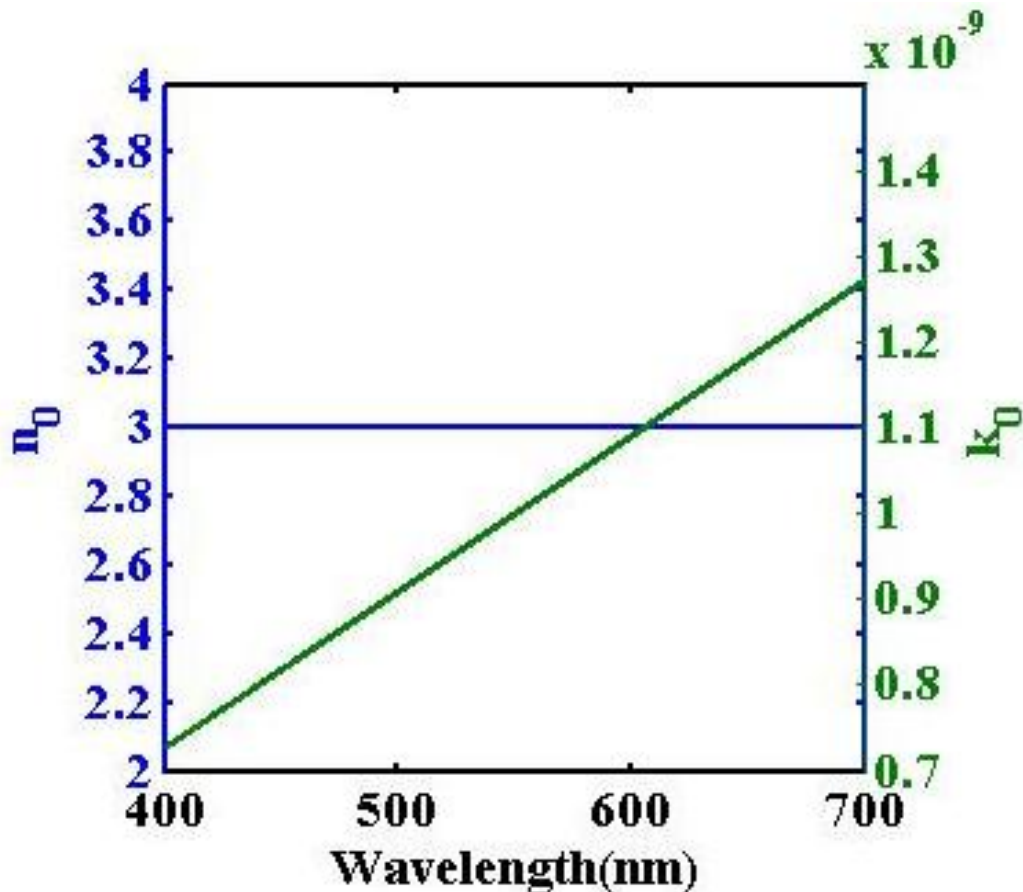
نهایت توانستیم به پهنای وسیعی از شدت نور فرودی با جذب بالای 99% دست یابیم که می‌تواند برای توسعه ابزارهای اپتوالکترونیکی مفید باشد.

تئوری

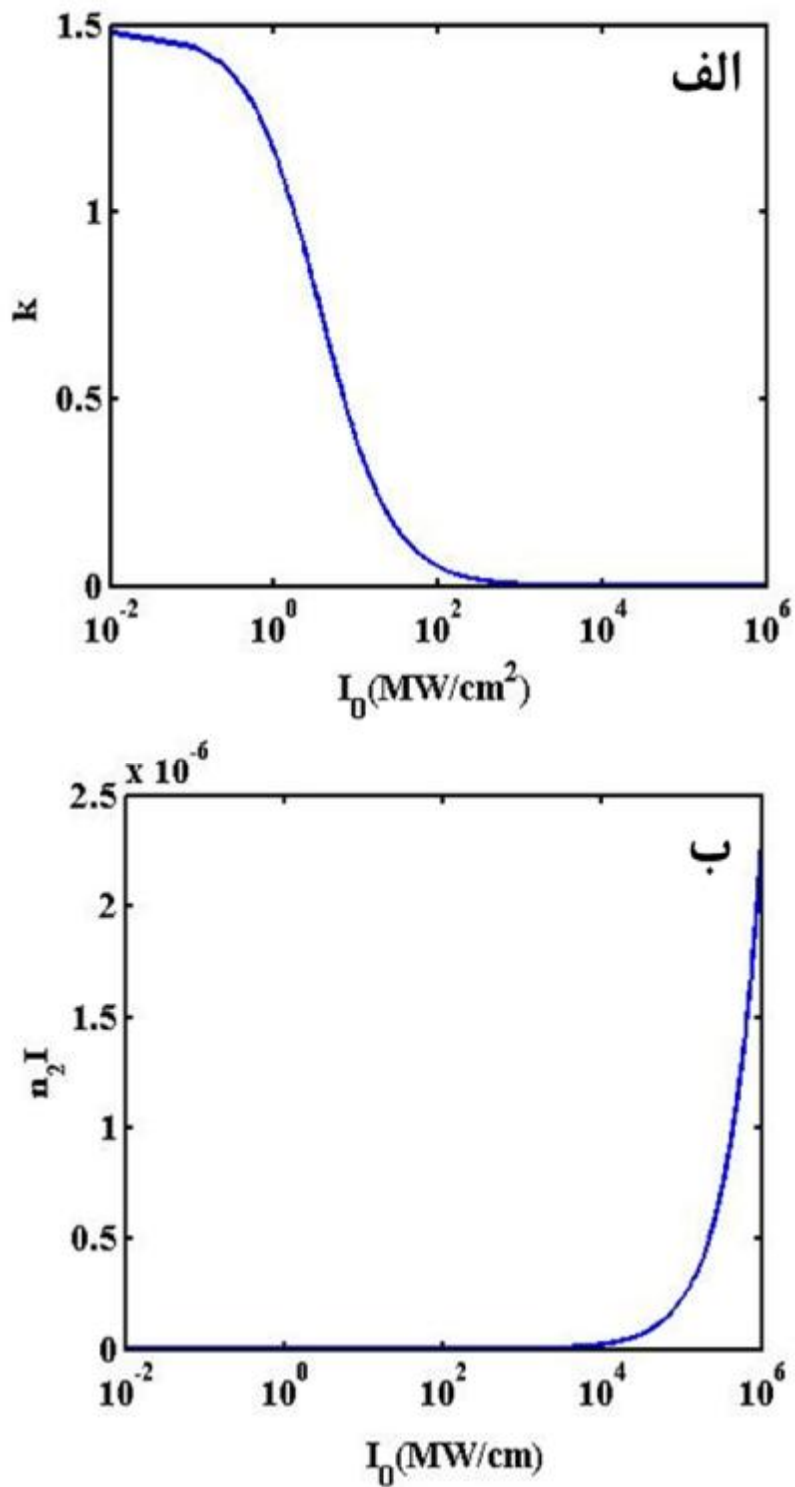
طرح ساده‌ای از ساختار مورد مطالعه در این مقاله، در شکل (1) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، زیرلایه از جنس SiO_2 و بلور فوتونی متشکل از لایه‌های متعدد Ta_2O_5 و SiO_2 است که به طور متناوب روی هم قرار گرفته است. نقص بلور فوتونی شامل دو لایه SiO_2 که بین آن یک لایه گرافن قرار دارد در نظر گرفته شده است. این قطعه در هوا قرار دارد و از نماد $\{D/Gr/D\}^N$ برای نمایش آن استفاده شده که در آن a, b, D و Gr به ترتیب معرف $\text{SiO}_2, \text{Ta}_2\text{O}_5, \text{SiO}_2$ و گرافن است.

مستقیم است و در این ناحیه دارای جذب 2/3% است [13]. در سال‌های اخیر، استفاده از گرافن در ساختارهای لایه‌ای و بلور فوتونی [14, 15]، میکروکاواک‌ها و آینه‌های براگ [16, 17] و ابرموادها [18]، به منظور افزایش میزان جذب خطی و غیرخطی در ناحیه طول موج مرئی پیشنهاد شده است.

ضریب جذب غیرخطی، به شدت نور در لایه گرافن بستگی دارد و با افزایش شدت نور، جذب زیاد می‌شود. در این مقاله به منظور افزایش شدت موج و جایگزینی موج در تک لایه گرافن، از بلور فوتونی یک بعدی همراه با نقص استفاده شده است که این جایگزینی سبب افزایش جذب نور می‌شود. بلور فوتونی مورد مطالعه شامل لایه‌های دی‌الکتریک متشکل از SiO_2 و Ta_2O_5 و دو لایه نقص SiO_2 و گرافن است. تأثیر دوره تناوب، زاویه و قطبش نور فرودی و همچنین اثرات جذب غیرخطی گرافن با تغییر در شدت نور فرودی در میزان جذب ساختار بررسی شد و در



شکل 2. قسمت حقیقی (آبی) و موهومی (سبز) ضریب شکست تک لایه گرافن بر حسب طول موج.



شکل 3. الف) قسمت موهومی و ب) قسمت حقیقی ضریب شکست غیرخطی تک لایه گرافن بر حسب شدت نور.

تعیین و محاسبه R و T، ضریب جذب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A = 1 - T - R \quad (5)$$

ضریب شکست SiO_2 و Ta_2O_5 به ترتیب برابر با 2/11 و 1/45 در نظر گرفته شده است [19] و ضریب شکست گرافن با استفاده از رابطه $n_{\text{Gr}} = 3 + i 5.446 \cdot 10^{-4}/3$ محاسبه می‌شود که در آن λ طول موج بر حسب نانومتر بیان می‌شود [15].

قسمت حقیقی ضریب شکست غیرخطی تک لایه گرافن با استفاده از اثر کر به صورت $n = n_0 + n_2 I$ تعریف می‌شود که در آن n_0 ضریب شکست خطی و n_2 قسمت حقیقی ضریب شکست غیرخطی است و با قسمت حقیقی ضریب پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم متناسب است و به صورت

$$n_2 = \left(\frac{3\pi}{4n_0^2 c \epsilon_0} \text{Re}(\chi^{(3)}) \right) \quad (6)$$

تعریف می‌شود که $\chi^{(3)}$ برای تک لایه گرافن $10^{-16} (1 - i) \text{m}^2/\text{n}^2$ در نظر گرفته شده است [20]. قسمت موهومی ضریب شکست با استفاده از رابطه $k = l a(I)/4p$ نشان داده می‌شود که α ضریب جذب اشباع

$$\alpha(I) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_s}} \quad (7)$$

است و α_0 ضریب جذب در حالت خطی و I_s شدت اشباع نامیده می‌شود [21].

ضخامت لایه‌های SiO_2 و Ta_2O_5 از رابطه $l_{\text{res}}/4 \cdot n(l_{\text{res}})$ و ضخامت لایه نقص از رابطه $l_{\text{res}}/2 \cdot n(l_{\text{res}})$ به دست می‌آید که در آن $n(l_{\text{res}})$ طول موج طراحی و $n(l_{\text{res}})$ ضریب شکست SiO_2 و Ta_2O_5 در طول موج مورد نظر می‌باشد. در محاسبه $\lambda_{\text{res}} = 818$ نانومتر انتخاب شده است.

M و N تعداد دوره تناوب بلور فوتونی را به ترتیب در زیر لایه نقص و بالای لایه نقص نشان می‌دهد. فرض می‌شود که نور از هوا با زاویه فرودی θ_{in} به ساختار می‌تابد.

طیف عبور، جذب و بازتاب ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال، TMM، محاسبه می‌شود [14]. ماتریس انتقال هر لایه در قطبش TE و TM به ترتیب M_s و M_p نشان داده و برابر با:

$$M_s = \begin{pmatrix} \cos b_j & -i \sin b_j \\ -i \sin b_j \cos q_j & \cos b_j \end{pmatrix} \quad (1)$$

و

$$M_p = \begin{pmatrix} \cos b_j & -i \sin b_j \cos q_j \\ -i \sin b_j & \cos b_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

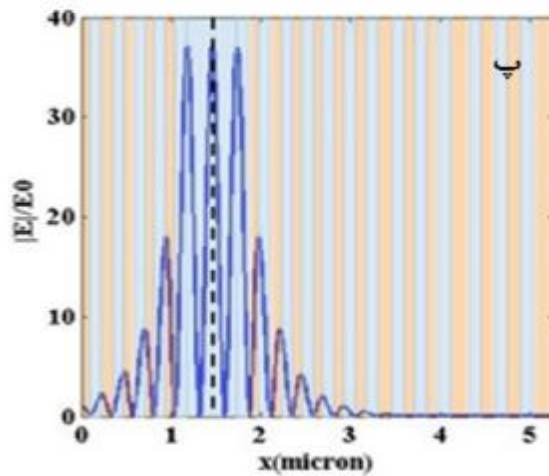
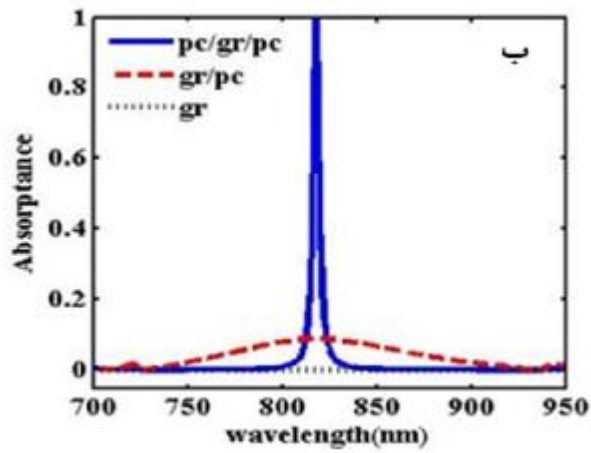
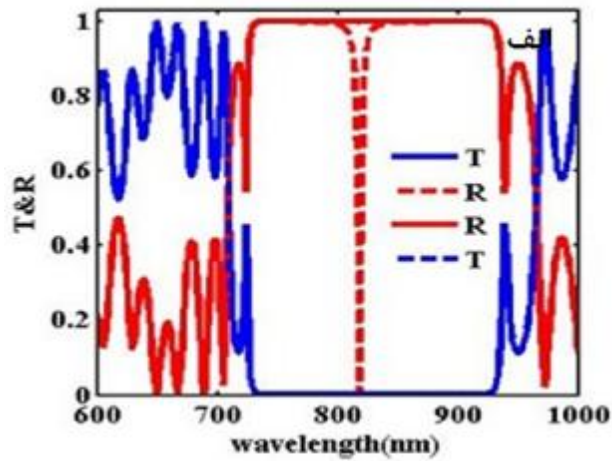
است که در آن $\beta_j = (2\pi/\lambda)n_j d_j$ است و n_j و d_j به ترتیب نشان‌دهنده طول موج، ضریب شکست و ضخامت مربوط به هر لایه است. همه مواد غیر مغناطیسی ($\mu = 1$) و ضریب شکست آنها برابر $n = \sqrt{\epsilon}$ فرض می‌شوند. ماتریس انتقال کل ساختار از ضرب ماتریس‌های تک تک لایه‌ها به دست می‌آید که با استفاده از آن ضرایب عبور و بازتاب کل ساختار از رابطه‌های

$$T = \frac{n_s \cos \theta_s}{n_0 \cos \theta_0} |t|^2 \quad (3)$$

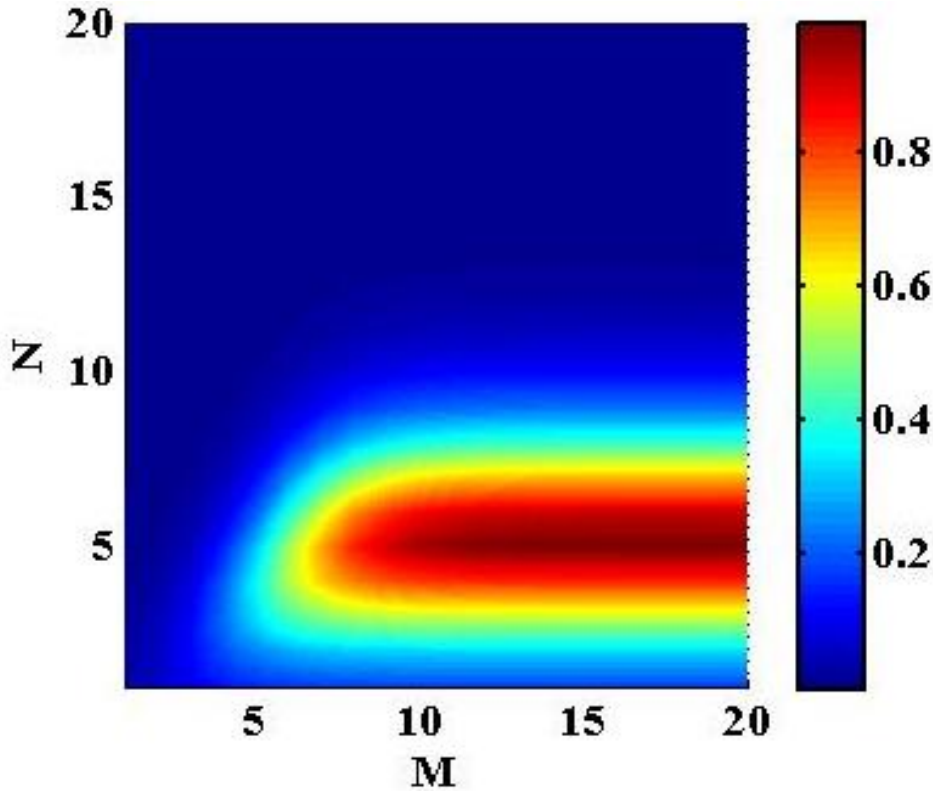
و

$$R = |r|^2 \quad (4)$$

محاسبه می‌شوند که در آن r و t به ترتیب نشان‌دهنده نسبت میدان عبوری و بازتابی بر میدان فرودی هستند. با



شکل 4. (الف) طیف عبور و بازتاب ساختار در حضور (خط چین) و نبود گرافن (خط). (ب) طیف جذب تک لایه گرافن و $(b/a)^N D/Gr/D (a/b)^M$ و $Gr/D(a/b)^M$. (ج) شدت ساختار $(b/a)^N D/Gr/D (a/b)^M$ بر حسب مکان.

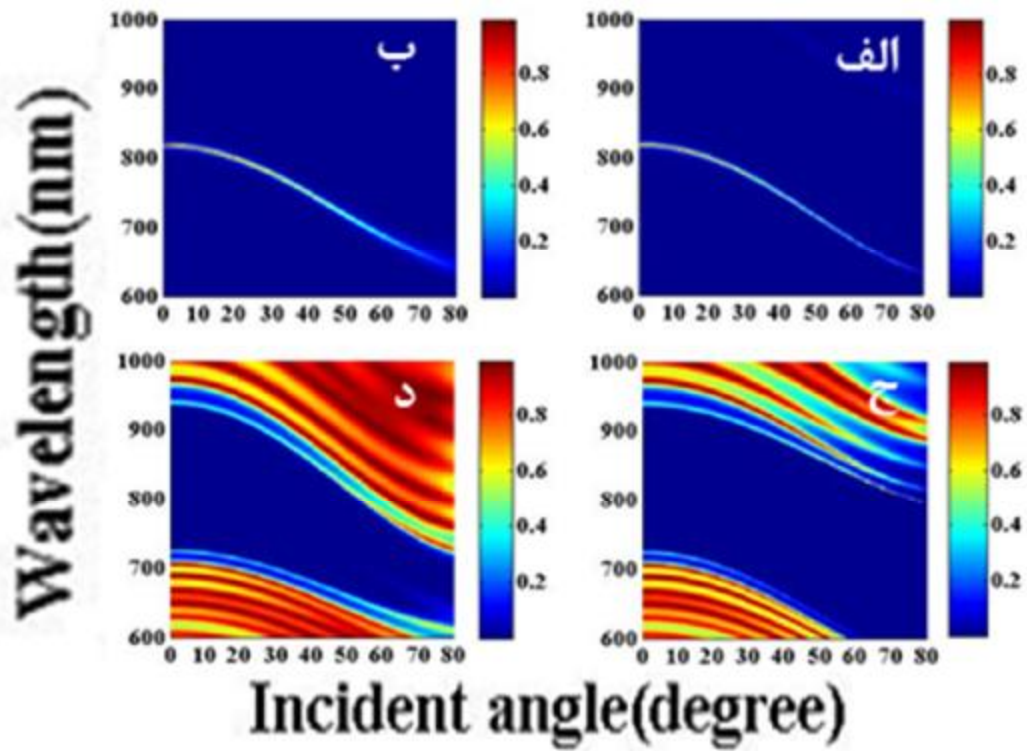


شکل 5. تأثیر دوره تناوب M و N بر روی اندازه جذب در طول موج 818 نانومتر.

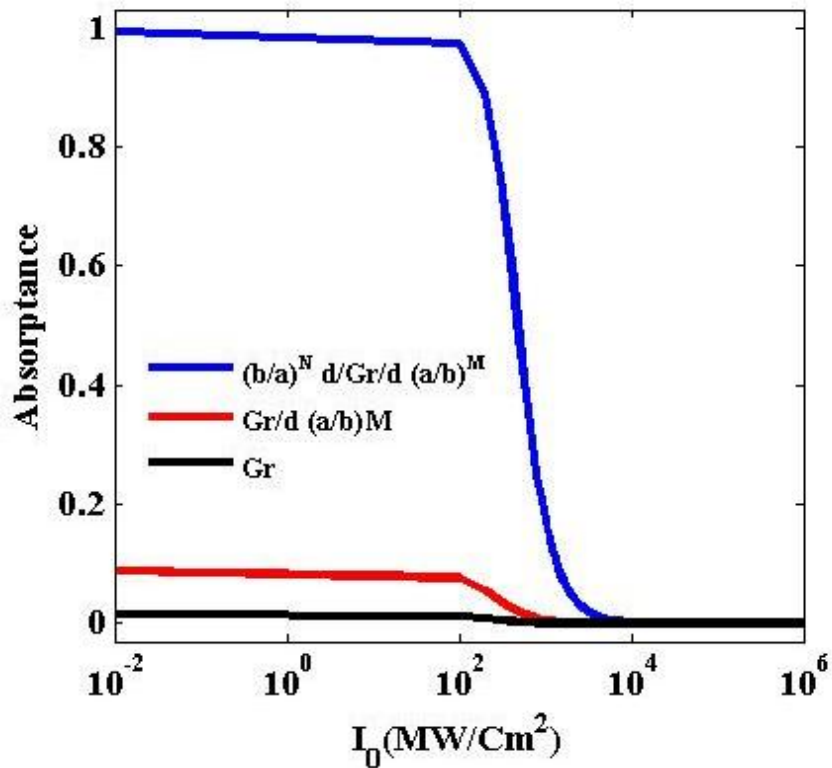
و به جذب تبدیل می‌شود. طیف جذب برای حالت‌های تک لایه گرافن و $Gr/D/(a/b)^M$ و $(b/a)^N D/Gr/D(a/b)^M$ به منظور بررسی اثر بلور فوتونی بر روی طیف جذب تک لایه گرافن در شکل (4-ب) رسم شده است. طیف جذب $(b/a)^N D/Gr/D(a/b)^M$ از دو حالت تک لایه گرافن و $Gr/D/(a/b)^M$ در حدود 99% بیشتر است. همان طور که ذکر شد، افزایش جذب ساختار به دلیل افزایش شدت ساختار در مکان گرافن است که در شکل (4.پ)، شدت موج در طول موج طراحی برحسب مکان برای ساختار با نقص نمایش داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که شدت موج در محل نقص جای‌گزیده شده و دارای بیشترین مقدار شدت است که این جای‌گزیدگی سبب افزایش جذب نور می‌شود. این امر تأیید کننده مزیت استفاده از بلور فوتونی با نقص است.

یافته‌ها

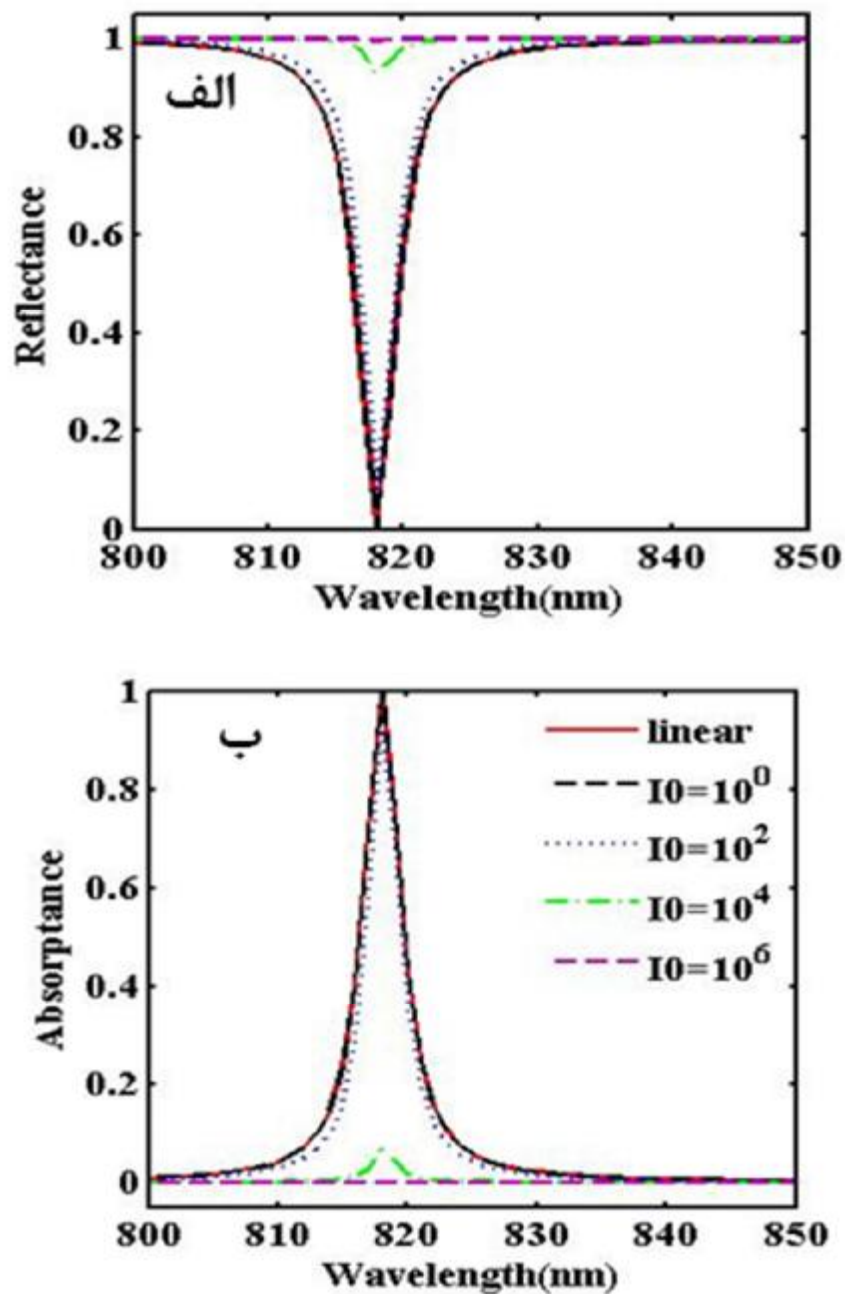
قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست خطی تک لایه گرافن در شکل (2) رسم شده است. در شکل (3) قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست غیرخطی تک لایه گرافن، $n_2 I$ و k ، بر حسب شدت نور فرودی رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود k در شدت‌های کمتر از 10^2 MW/cm^2 و $n_2 I$ در شدت‌های بالاتر از 10^4 MW/cm^2 بیشترین مقدار را دارند. به منظور دستیابی به ساختار بهینه برای افزایش جذب در تک لایه گرافن باید که شدت و جای‌گزیدگی موج در لایه گرافن افزایش یابد. ابتدا، طیف عبور و بازتاب ساختار در دو حالت حضور و عدم حضور تک لایه گرافن برای بلور فوتونی به ازای مقدارهای $M=15$ و $N=5$ در شکل (4) رسم شده است. در شکل (4-الف) مشاهده می‌شود که طیف عبور در دو حالت یکسان است؛ ولی طیف بازتاب در طول موج طراحی 818 نانومتر در حضور گرافن کاهش شدیدی می‌یابد



شکل 6. تأثیر زاویه فرود روی میزان جذب ساختار الف) در قطبش TE، ب) قطبش TM و روی طیف عبور ج) در قطبش TE، د) قطبش TM.



شکل 7. جذب ساختار تک لایه گرافن و $Gr/D/(a/b)^M$ و $(b/a)^N D/Gr/D (a/b)^M$ برحسب شدت نور فرودی.



شکل 8. تأثیر شدت نور فرودی بر روی الف) طیف بازتاب و ب) طیف جذب ساختار.

داده شده است. با تغییر N ، میزان جذب از مقدار 1 تا 5 افزایش و به ازای $N > 5$ کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار M از 1 تا 15 میزان جذب افزایش می‌یابد و برای $M \geq 15$ تغییری در مقدار جذب

تناوب‌های M و N از عوامل مؤثر در جای‌گزینی و شدت موج در نقص و جذب ساختار هستند. در شکل (5)، به منظور دستیابی به مقدار بهینه M و N ، رفتار جذب ساختار در قله مد نقص برای مقادیر مختلف M و N نمایش

است. جذب ساختار نسبت به تک لایه گرافن و $Gr/D/(a/b)^M$ افزایش 50 و 12/5 برابر دارد که نشان‌دهنده اهمیت بلور فوتونی بر جذب ساختار است. با توجه به شکل، طیف جذب ساختار دارای دو مقدار بیشینه (99%) در شدت‌های کمتر از $10^2 MW/cm^2$ و صفر در شدت‌های بالاتر از $10^4 MW/cm^2$ است که آستانه بالا و پایین شدت نام‌گذاری می‌شوند و این رفتار مشابه رفتار قسمت موهومی ضریب شکست (شکل 3. الف) است.

در تأیید رفتار شکل (7)، میزان جذب و بازتاب، برحسب طول موج برای چند شدت انتخابی، در شکل (8) بررسی شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش شدت نور فرودی، میزان بازتاب در طول موج 818 نانومتر افزایش می‌یابد؛ به طوری که در شدت‌های بالاتر از 10^4 مقدار بازتاب به یک نزدیک می‌شود؛ در حالی که با افزایش شدت نور فرودی طیف جذب کاهش می‌یابد و به صفر نزدیک می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

با هدف دست‌یابی به میزان جذب بالا، از بلور فوتونی دارای نقص با لایه‌های دی‌الکتریک متشکل از Ta_2O_5 و SiO_2 و دو لایه نقص SiO_2 و گرافن استفاده شده است. با بررسی ویژگی‌های اپتیکی محاسبات عددی نشان می‌دهد که در مد نقص طیف جذب بالا با پهنای کم در طول موج 818 نانومتر مشاهده می‌شود که با تغییر در تعداد دوره تناوب و زاویه فرود و قطبش تنظیم‌پذیر است. همچنین با افزایش شدت نور فرودی پدیده غیرخطی ضریب جذب و ضریب شکست در محاسبه در نظر گرفته شده است. جذب بر حسب شدت نور فرودی دارای دو مقدار 99% در شدت‌های کمتر از $10^2 MW/cm^2$ و صفر در شدت‌های بالاتر از $10^4 MW/cm^2$ است که می‌تواند در کاربردهای غیرخطی اپتوالکترونیکی مفید باشد.

حاصل نمی‌شود. در نتیجه بهترین میزان جذب، در حدود 99%، به ازای $N=5$ و $M=15$ به دست می‌آید. شکل (4)، بر اساس این مقدار بهینه رسم شده است. از دیگر عوامل تأثیرگذار بر میزان جذب و پهنای گاف، زاویه فرود و نوع قطبش هستند. به همین منظور، تأثیر زاویه فرودی بر میزان عبور و جذب برای هر دو قطبش TE و TM، در شکل (6)، بررسی شده است. در تمامی ساختارها، نور از هوا وارد ساختار می‌شود. در بازتاب خارجی زاویه حد وجود ندارد. تأثیر زاویه فرودی بر میزان قله جذب در هر دو قطبش TE (شکل 6 - ب) و الف) و قطبش TM (شکل 6 - ج) رسم شده است که با افزایش زاویه، قله جذب کاهش یابد و به سمت طول موج‌های کمتر میل می‌کند. برای مشاهده تأثیر زاویه و قطبش نور فرودی بر گاف نواری، میزان عبور بر حسب زاویه فرود و طول موج در شکل (6 - ج) و (6 - د) رسم شده است. ناحیه‌ای که عبور صفر است گاف نواری نامیده می‌شود که لبه بالایی و پایینی گاف نواری در هر دو قطبش با افزایش زاویه به سمت طول موج‌های کمتر میل می‌کند. با افزایش زاویه انتشار در قطبش TE، پهنای گاف افزایش می‌یابد، در حالی که پهنای گاف در قطبش TM به دلیل نزدیکی به زاویه شبه بروستر کاهش می‌یابد.

تا اینجا به دلیل شدت نور فرودی کم، فقط ویژگی‌های اپتیکی خطی ساختار بررسی شده است. اکنون برای مشاهده اثرات غیرخطی شدت نور فرودی افزایش داده می‌شود. با توجه به شکل (3)، قسمت موهومی ضریب شکست غیرخطی در شدت‌های کمتر از $10^2 MW/cm^2$ زیاد است و در شدت‌های بالاتر از $10^2 MW/cm^2$ به شدت کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد که نشان‌دهنده جذب بالا در شدت‌های کمتر از $10^2 MW/cm^2$ است. طیف جذب به عنوان تابعی از شدت نور فرودی در طول موج مد نقص 818 نانومتر برای سه حالت تک لایه گرافن و $Gr/D/(a/b)^M$ و $(b/a)^N D/Gr/D (a/b)^M$ در شکل (7) رسم شده

References

- [1] Pillai S, Catchpole K, Trupke T, Green M. Surface plasmon enhanced silicon solar cells. *Journal of applied physics*. 2007;101(9):093105.
- [2] Huo N, Kang J, Wei Z, Li SS, Li J, Wei SH. Novel and enhanced optoelectronic performances of multilayer MoS₂ – WS₂ heterostructure transistors. *Advanced Functional Materials*. 2014; 24(44): 7025-31.
- [3] Sergeant NP, Pincon O, Agrawal M, Peumans P. Design of wide-angle solar-selective absorbers using aperiodic metal-dielectric stacks. *Optics express*. 2009; 17(25): 22800-12.
- [4] Song H, Jiang S, Ji D, Zeng X, Zhang N, Liu K, et al. Nanocavity absorption enhancement for two-dimensional material monolayer systems. *Optics express*. 2015; 23(6): 7120-30.
- [5] Weismann M, Panoiu NC. Theoretical and computational analysis of second- and third-harmonic generation in periodically patterned graphene and transition - metal dichalcogenide monolayers. *Physical Review B*. 2016; 94(3): 035435.
- [6] Zhang S, Zhang X. Strong second-harmonic generation from bilayer-graphene embedded in one-dimensional photonic crystals. *JOSA B*. 2016;33(3):452-60.
- [5] Cheng J, Vermeulen N, Sipe J. Third order optical nonlinearity of graphene. *New Journal of Physics*. 2014; 16(5): 053014.
- [8] Hendry E, Hale PJ, Moger J, Savchenko A, Mikhailov S. Coherent nonlinear optical response of graphene. *Physical review letters*. 2010; 105(9): 097401.
- [9] Kumar N, Kumar J, Gerstenkorn C, Wang R, Chiu H-Y, Smirl AL, et al. Third harmonic generation in graphene and few-layer graphite films. *Physical Review B*. 2013;87(12):121406.
- [10] Wang J, Hernandez Y, Lotya M, Coleman JN, Blau WJ. Broadband nonlinear optical response of graphene dispersions. *Advanced Materials*. 2009; 21(23): 2430-5.
- [11] Feng M, Zhan H, Chen Y. Nonlinear optical and optical limiting properties of graphene families. *Applied Physics Letters*. 2010; 96(3): 033107.
- [12] Yang H, Feng X, Wang Q, Huang H, Chen W, Wee AT, et al. Giant two-photon absorption in bilayer graphene. *Nano letters*. 2011; 11(7): 2622-7.
- [13] Nair RR, Blake P, Grigorenko AN, Novoselov KS, Booth TJ, Stauber T, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*. 2008; 320 (5881): 1308.
- [14] Liu J-T, Liu N-H, Li J, Jing Li X, Huang J-H. Enhanced absorption of graphene with one - dimensional photonic crystal. *Applied Physics Letters*. 2012; 101(5): 052104.
- [15] Peres NM, Bludov YV. Enhancing the absorption of graphene in the terahertz range. *EPL (Europhysics Letters)*. 2013; 101(5): 58002.
- [16] Denisultanov A, Azbite S, Khodzitsky M, editors. Influence of magnetic field on the surface waves properties in the photonic crystal/graphene structure for terahertz frequency range. *Journal of Physics: Conference Series*; 2014: IOP Publishing.
- [17] Hajian H, Soltani-Vala A, Kalafi M. Optimizing terahertz surface plasmons of a monolayer graphene and a graphene parallel plate waveguide using one-dimensional photonic crystal. *Journal of Applied Physics*. 2013; 114(3): 033102.
- [18] Alaei R, Farhat M, Rockstuhl C, Lederer F. A perfect absorber made of

- a graphene micro-ribbon metamaterial. *Optics express*. 2012; 20(27): 28017-24.
- [19] Palik E, Ghosh G. *Handbook of optical constants of solids*, Acad. Press, San Diego. 1998; 3.
- [20] Vincenti M, De Ceglia D, Grande M, D'Orazio A, Scalora M. Nonlinear control of absorption in one-dimensional photonic crystal with graphene-based defect. *Optics letters*. 2013; 38(18): 3550-3.
- [21] Martinez A, Fuse K, Yamashita S. Mechanical exfoliation of graphene for the passive mode-locking of fiber lasers. *Applied Physics Letters*. 2011; 99(12): 121107.