بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

رفتار جذب یکسویه در بلور فوتونی سه تایی شامل گرافن و لایه نقص MoS_2

نیر پورقربان، فاطمه مسلمی و کاظم جمشیدی قلعه

گروه فیزیک دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

چکیده - تک‌لایه‌های گرافن و مولیبدینییوم دی‌سولفاید (MoS_2) به‌تنهایی به دلیل ضخامت کم جذب ناچیزی دارند. ترکیب این نوع مواد در ساختار بلور فوتونی می‌تواند سبب افزایش جذب ساختار شود. در این کار، ساختاری از بلور فوتونی با تناوب سه‌تایی به‌شکل $(ABG)^n\ CMoS_2C\ (GBA)^m$ پیشنهاد شده که در آن لایه‌های A، B و C مواد دی‌الکتریک، G نشان دهنده لایه گرافن وترکیب $CMoS_2C$ به عنوان لایه‌ی نقص می‌باشند. طیف جذبی ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که ساختار فوق در ناحیه طیف مرئی رفتار جذب یک‌سویه دارد. اثر مکان لایه‌ی نقص، قطبش و راستای میدان تابشی در رفتار جذب یکسویه مطالعه و بهینه شده است. مکان مد جذبی مستقل از نوع قطبش بوده ولی شدت پیک و پهنای آن در قطبش TE بسته به جهت تابش با تغییر زاویه رفتار متفاوت دارد. لازم به ذکر است که وجود لایه گرافن باعث افزایش جذب ساختار می‌شود.

کلید واژه- بلور فوتونی سه‌تایی، تک لایه‌ی MoS_2، جذب یکسویه، گرافن

One-Way Absorption Behavior in Ternary P**C Containing** Graphene and MoS_2 Defect Layer

Nayyer Pourgorban, Fatemeh Moslemi, and Kazem Jamshidi- Ghaleh

Department of Physics, Azarbaijan Shahid Madani University

Abstract- **Graphene and MoS_2 monolayers have little absorption due to their very low thickness. By** introducing those materials in structure of a photonic crystal (PC)**,** can increase **the** absorption. In this work, a PC structure with ternary periodicity in the form of $(ABG)^n\ CMoS_2C\ (GBA)^m$ is proposed, where A, B and C layers are the dielectric materials, G is denoting the Graphene and the segment $CMoS_2C$ is introduced as the defect layer. The absorption spectrum of the structure is investigated using the transfer matrix method. The results show that this structure has the one-way absorption in the visible spectral region. The effect of the defect layer location, the polarization and the direction of the incident field on one-way absorption behavior is studie**d and optimized. The location of the absorption mode is independent of the polarization type but its peak intensity and width in TE polarization dependent on incident direction varies by angle of incident. It should be mentioned that incorporating of graphene yield to enhancement of the absorption.**

Keywords: : Ternary photonic crystal, MoS_2 monolayer, One-way absorption, Graphene

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

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

مقدمه

امروزه ساختارهای تک‌لایه از مواد مثل گرافن و دیگر مواد که مواد گرافن‌گونه نامیده می‌شوند به خاطر خواص الکتریکی و نوری ویژه‌ای که دارند، کاندیدای مناسبی برای کنترل ویژگیهای نوری در بلورهای فوتونی هستند. گرافن به ضخامت یک اتم کربن دارای شبکه لانه زنبوری با ساختار دوبعدی از اتم های کربن است. این ماده یک شبه فلز بدون گاف باند با رسانندگی الکتریکی بالایی است [۱]. از طرفی مواد گرافن گونه مانند MoS_2 نیز به‌عنوان نیم‌رسانای دوبعدی که شامل اتم‌های S (گوگرد) و Mo (مولیبدینیوم) است، شبکه‌ی لانه زنبوری دارد. از ویژگیهای مهم MoS_2 می‌توان به شفافیت، گاف باند مسقیم، قدرت انتقال بار بالا اشاره کرد [۲]. در مقاله چاپ شده اخیر نشان داده شده که تک‌لایه MoS_2 به‌تنهایی به دلیل ضخامت کم جذب ناچیزی دارد. با معرفی MoS_2 به عنوان لایه‌ی نقص در ساختاری از بلور فوتونی تحت زاویه‌ی خاصی رفتار جذب یکسویه تقویت و به حداکثر مقدار ۷۰٪ رسید [۳]. برای افزایش مقدار حداکثری جذب نسبی پیشنهاد ما در این کار استفاده از لایه‌های گرافن در کنار لایه‌ی نقص MoS_2 در ساختاری از بلور فوتونی با تناوب سه تایی است. نتایج نشان می دهند که با وارد کردن گرافن در ساختار بلور مقدار جذب به حدود بالاتر از ۹۰ ٪ می رسد. اثر مکان لایه‌ی نقص، قطبش میدان و راستای میدان تابشی در رفتار جذب یکسویه مطالعه و بهینه شده است.

مدل و تئوری

در این کار، ساختاری از بلور فوتونی با تناوب سه‌تایی به شکل $(ABG)^nCMoS_2C(GBA)^m$ پیشنهاد شده که در آنها لایه‌های A وB به‌ترتیب محیط‌های دی‌الکتریک SiO_2 و ZnS با ضرایب شکست $n_A=1.55$, $n_B=2.59$ انتخاب شده‌اند. ضخامت‌های نوری در هر لایه ربع طول موج مرکزی است. به عبارتی دیگر $n_Bd_B=n_Ad_A=\lambda_0/4$ که در آن $\lambda_0=550\,nm$ است. G، تک لایه‌ی گرافن با ضخامت $0.34\ nm$ و ضریب شکست $n_g=3+ic_1\frac{\lambda}{3}$ که در آن $c_1=5.446\,\mu m^{-1}$ است، در نظر گرفته شده است [۴]. تک لایه‌ی MoS_2 با ضخامت $0.65\ nm$ همراه با جفت لایه C به‌عنوان لایه‌ی نقص عمل می‌کنند. نتایج بررسی‌ها بیانگر آن است که بهینه جذب از ساختار وقتی حاصل می‌شود که محیط C همان محیط A در نظر گرفته شود. از آنجایی که گذردهی الکتریکی MoS_2 مختلط است [۵]، قسمت موهومی گذردهی الکتریکی به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$\varepsilon_i(\omega)=\frac{f_{ex}^A\Gamma_A}{(E_\omega-E_{ex}^A)^2+\Gamma_A^2}+\frac{f_{ex}^B\Gamma_B}{(E_\omega-E_{ex}^B)^2+\Gamma_B^2}+\frac{f_b^e}{h\nu}\Theta(E_\omega-E_g,\Gamma_{band}) \quad (۱)$$

که ثابت های موجود در معادله (۱) عبارتند از:

$$\Gamma_A=28mev,\ f_{ex}^A=0.32mev,\ E_{ex}^A=1.884ev$$
$$\Gamma_B=42mev,\ f_{ex}^B=0.43mev,\ E_{ex}^B=2.02ev$$

و تابع پله ای Θ نیز از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\Theta(x,\Gamma_{band})=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{x}\frac{\Gamma}{\Gamma^2+\psi^2}d\psi \quad (۲)$$

و درنهایت، قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی MoS_2 از انتگرال کرامرز- کرونیگ به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon_r(\omega)=4.2+\frac{1}{\pi}P\int_0^\infty\frac{s\,\varepsilon_i(s)}{s^2-\omega^2}ds \quad (۳)$$

که در آن P مقدار اصلی انتگرال است. برای بررسی رفتار جذب ساختار از روش ماتریس انتقال خطی استفاده شده است [۶]. مطابق این روش ضرایب بازتاب و عبور به‌ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$r(\omega)=\frac{(m_{11}-m_{22})\cos(\theta)+i(m_{12}\cos^2(\theta)+m_{21})}{(m_{11}+m_{22})\cos(\theta)+i(m_{12}\cos^2(\theta)-m_{21})} \quad (۴)$$

$$t(\omega)=\frac{2\cos(\theta)}{(m_{11}+m_{22})\cos(\theta)+i(m_{12}\cos^2(\theta)-m_{21})} \quad (۵)$$

در روابط بالا θ، زاویه‌ی موج تابشی و m_{ij}ها عناصر ماتریس انتقال کل ساختار هستند و از حاصل ضرب ماتریس انتقال تک‌تک لایه‌ها بدست می‌آیند. در نهایت تراگسیل، انعکاس و جذب ساختار به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آیند:

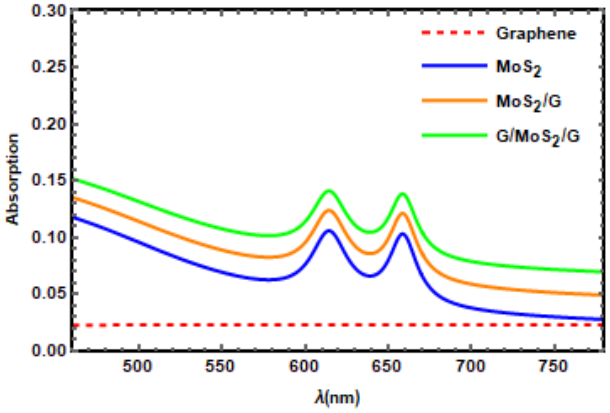
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

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

$$T=|t|^2,\quad R=|r|^2,\quad A=1-T-R \qquad (۶)$$

نتایج محاسبات عددی

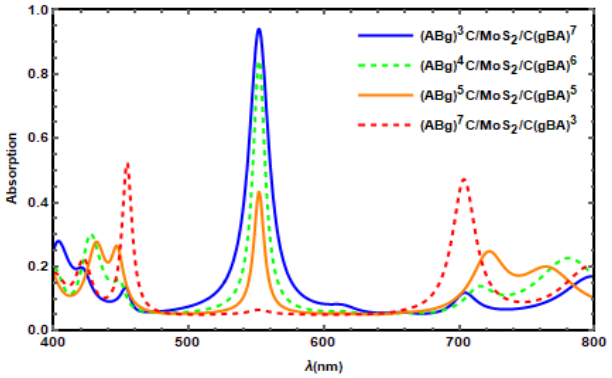
شکل ۱، طیف جذبی از تک‌لایه‌های گرافن، MoS_2 و ترکیبشان با هم را برحسب طول موج نشان می‌دهد. تک لایه‌های گرافن و MoS_2 به‌تنهایی به دلیل ضخامت کم جذب ناچیزی دارند. مشاهده می‌شود در حالتی که تک لایه‌ی MoS_2 با دو جفت گرافن ترکیب شده (منحنی سبز)، جذب به نسبت بیشتر است.



شکل ۱: طیف جذبی از تک لایه‌های گرافن و MoS_2 با طول موج تابشی.

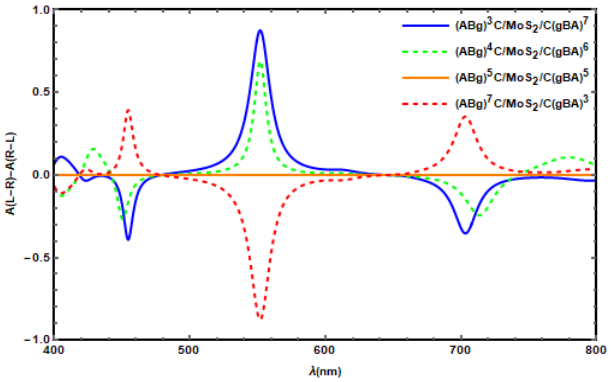
به‌کار بردن این نوع مواد در ساختارهایی از بلور فوتونی سبب افزایش جذب ساختار خواهد شد. در این کار ساختاری از بلور فوتونی با تناوب سه‌تایی شامل گرافن و لایه‌ی نقص MoS_2 به‌شکل $(ABG)^nCMoS_2(GBA)^m$ را پیشنهاد و رفتار جذب یکسویه از آن را بررسی می‌کنیم.

شکل ۲، طیف جذبی برای چهار مکان متفاوت قرار گرفتن لایه‌ی نقص در ساختار را بر حسب طول موج نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود وقتی لایه‌ی نقص بعد از تناوب سوم (منحنی آبی) وارد ساختار شود، ارتفاع مد جذبی زیاد شده و جذب به بیش از ۹۰ ٪ می‌رسد. با افزایش تناوب از سمت چپ و متناظرا کاهش تناوب از سمت راست ارتفاع مد جذبی کمتر تا اینکه در تناوب هفتم تقریبا مد جذبی از بین می‌رود. این بدان معنی است که چگونگی طراحی ساختار تاثیر بسزایی روی ویژگی‌های مد نقص حاصل دارد و این در حالی است که مکان مد نقص متاثر از مکان لایه‌ی نقص نیست.



شکل ۲: طیف جذبی ساختار برای مکان‌های متفاوت لایه نقص با طول موج.

در شکل ۳، رفتار جذب نسبی (اختلاف اندازه‌های شدت چپ از راست) برای مکانهای متفاوت لایه نقص بر حسب طول موج بررسی و مقایسه شده است. برای تناوب سوم از سمت چپ، جذب نسبی بیشترین مقدار را در طول موج ۵۵۰ نانومتر دارد. با افزایش تناوب سمت چپ و متناظرا کاهش تناوب از سمت راست اندازه‌ی جذب نسبی کمتر و در تناوب پنجم به صفر می‌رسد. از تناوب پنجم به بعد اندازه‌ی جذب نسبی در جهت منفی رو به افزایش است به‌عبارتی جذب یک‌سویه از راست به چپ اتفاق می‌افتد.



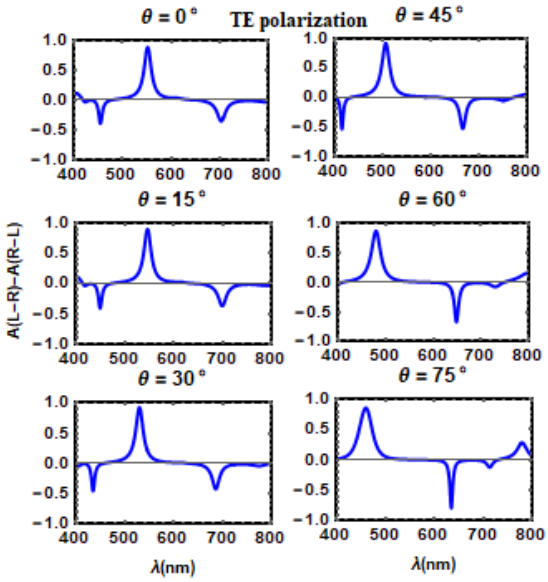
شکل ۳: اثر محل قرارگیری لایه‌ی نقص بر رفتار جذب نسبی با طول موج.

حال به بررسی اثر نوع قطبش در زوایای تابشی متفاوت بر رفتار جذب یکسویه می‌پردازیم. در ابتدا قطبش نور را TE فرض می‌کنیم. شکل ۴، رفتار جذب یک‌سویه را در زوایای تابشی متفاوت نشان می‌دهد. افزایش زاویه سبب جابجایی پیک مد جذبی به سمت طول موجهای کوچکتر(جابجایی آبی) و همچنین افزایش پهنای مد جذبی می‌شود. علاوه بر آن با افزایش زاویه، اندازه‌ی جذب نسبی در مد جذبی تا زاویه‌ی ۴۵ درجه افزایش می‌یابد که بیشترین جذب نسبی

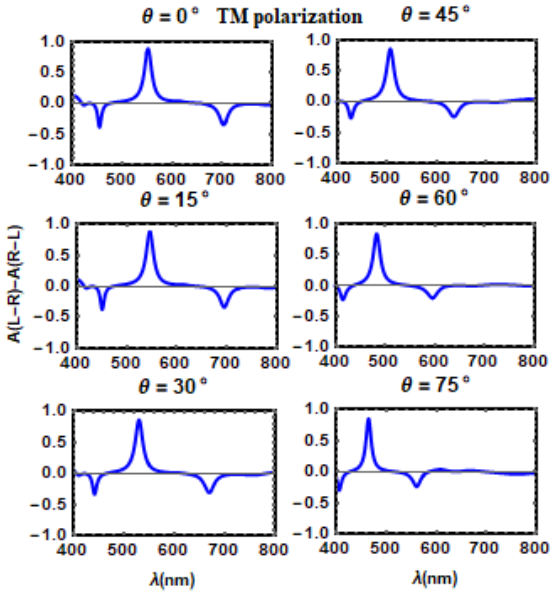
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

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

در زاویه‌ی ۴۵ درجه در طول موج ۵۰۵ نانومتر مشاهده می‌شود. در زوایای بزرگتر از ۴۵ درجه نیز مد جذبی جدیدی که رفتار یکسویه از راست به چپ دارد ظاهر و در زاویه‌ی ۷۵درجه به بیشترین مقدار با کمترین پهنا می‌رسد.



شکل ۴: اثر زاویه‌ی تابشی بر رفتار جذب نسبی در قطبش TE با طول موج.



شکل ۵: اثر زاویه‌ی تابشی بر رفتار جذب نسبی در قطبش TM با طول موج.

اثر زاویه‌ی تابش بر رفتار جذب یکسویه برای قطبش TM در شکل ۵، بررسی شده است. در این قطبش نیز، با افزایش زاویه‌ی تابش، پیک مد جذبی به سمت طول موجهای کوچکتر جابجا شده ولی تغییر زاویه تاثیری در اندازه‌ی جذب نسبی و پهنای مد جذبی ندارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که مکان مد جذبی مستقل از نوع قطبش است.

نتیجه گیری

یکی از راههای افزایش جذب از ساختارهای بلور فوتونی، معرفی لایه نقص MoS_2 در ساختار می باشد. در مقاله چاپ شده اخیر، با وارد کردن لایه‌ی نقص MoS_2، افزایش جذب نسبی ۷۰٪ از ساختار معرفی شده، مشاهده شد. برای افزایش مقدار جذب نسبی به حدود بالاتر از ۹۰٪ پیشنهاد ما در این کار، استفاده از لایه‌های گرافن در کنار لایه‌ی نقص MoS_2 در ساختاری از بلور فوتونی با تناوب سه‌تایی بود. طیف جذبی ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال مورد مطالعه قرار گرفت. اثر مکان لایه نقص در رفتار جذب یکسویه بررسی شد. بهینه حالت جذب یک‌سویه از ساختار در حالتی که لایه‌ی نقص بعد از تناوب سوم در ساختار قرار گرفت، اتفاق افتاد. همچنین اثر قطبش و راستای میدان تابشی بر رفتار جذب یک‌سویه بررسی و نتایج نشان دادندکه مکان مد جذبی مستقل از نوع قطبش بوده ولی شدت پیک و پهنای آن در قطبش TE وابسته به جهت موج تابشی است و بیشترین جذب یکسویه در زاویه ۴۵ درجه مشاهده شد.

مرجع ها

[1] A. K. Geim, K.S. novoselov, “The rise of graphene”. Nature materials. 6, 3, 183-191, 2007.

[2] K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, et al, “Atomically thin MoS2: a new direct-gap semiconductor”, Phys. Rev. Lett. 105, 136805, 2010.

[۳] مسلمی. فاطمه، جمشیدی قلعه. کاظم، پور قربان. نیر، ”رفتار جذب یک‌سویه بلور فوتونی یک‌بعدی با لایه‌ی نقص MoS_2“ سی و پنجمین کنفرانس ملی فیزیک ایران، شهریور ۱۳۹۸. ۴۹۴ تا ۴۹۷

[4] M. Bruna. & S. Borini, “Optical constants of graphene layers in the visible range”. Appl. Phys. Lett. 94, 031901, 2009.

[5] J. T. Liu, T. B. Wang, X. J. Li, N. H. Liu, “Enhanced absorption of monolayer MoS_2 with resonant back reflector”, J. apply. phys. 115, 193511, 2014.

[6] P. Yeh, “Optical waves in layered media”, John Wiley & Sons, New York, 2005.

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

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