



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰



بررسی جذب قطبش‌های دایروی نور در ساختار حاوی گرافن

آیلار توشی^{۱*}، رضا عبدی قلعه^۱، بیتا رومی^۱، امیر مدنی^۱، رباب زادجمال سیفی^۱

^۱ گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، ایران
* نویسنده مسئول: aylartooshi@gmail.com

چکیده - در این مقاله، با توجه به پاسخ اپتیکی متفاوت گرافن تحت یک میدان مغناطیسی خارجی برای نور راست‌گرد و چپ‌گرد دایروی، ساختار حساس به جاذب نور دایروی در ناحیه فرکانسی تراهرتز پیشنهاد شده است. از روش تحلیلی برای به دست آوردن جذب ساختار استفاده شده است. بررسی طیف جذب قطبش‌های دایروی به ازای میدان‌های مغناطیسی مختلف، نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی در یک فرکانس خاص، نور با قطبش دایروی چپ‌گرد را کاملاً جذب و نور با قطبش دایروی راست‌گرد را به طور عمده بازتاب می‌دهد.

کلیدواژه - جذب، قطبش دایروی، گرافن، میدان مغناطیسی.

Investigation of circularly polarized light absorption in a structure containing the graphene

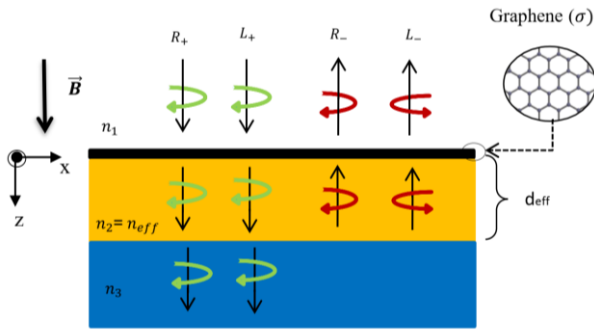
Aylar Tooshi^{1*}, Reza Abdi-Ghaleh¹, Bitar Roumi¹, Amir Madani¹, Robab Zadjamal Sayfi¹

Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

*Corresponding author: aylartooshi@gmail.com

Abstract- In this paper, according to the different optical responses of the graphene under an external magnetic field for a left- and right-handed circular lights, a circular sensitive absorber structure in the terahertz frequency region has been proposed. An analytical method has been used for calculating the absorption of the structure. Investigations of the circular polarizations' absorption spectra for the different magnetic field strengths show that the proposed structure absorbs the left-handed circularly polarized light at a particular frequency, and significantly reflects the right-handed one at the same frequency.

Keywords: Absorption, Circular polarization, Graphene, Magnetic field.



شکل ۱: ساختار جاذب پیشنهادی حساس به قطبش دایروی.

رسانندگی گرافن تحت اعمال میدان مغناطیسی عمود به صورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$\sigma_{\parallel} = \frac{\sigma_0(1+i\omega\tau)}{[(\omega_c\tau)^2 + (1+i\omega\tau)^2]}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\perp} = -i \frac{\sigma_0\omega_c\tau}{[(\omega_c\tau)^2 + (1+i\omega\tau)^2]}, \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \left(\frac{2e^2\tau}{\pi\hbar^2}\right)k_B T \ln[2 \cosh\left(\frac{\mu_c}{2k_B T}\right)], \quad (3)$$

$$\omega_c = \frac{eB_0 V_F^2}{\mu_c}, \quad \text{فرکانس سیکلوترون،} \quad \mu_c = \frac{e\tau v_F^2}{\mu}$$

$$\text{پتانسیل شیمیایی،} \quad \tau = \frac{\mu\hbar(n_s\pi)^{\frac{1}{2}}}{eV_F}$$

زمان پراکندگی و μ تحرک‌پذیری الکترون‌ها در گرافن هستند [۳]. برای به دست آوردن ضرایب بازتاب، عبور و جذب، طبق نظریه محیط مؤثر، گرافن روی زیرلایه را به عنوان یک لایه‌ی مستقل در نظر می‌گیریم. در این صورت مؤلفه‌های ثابت دی‌الکتریک گرافن به صورت زیر تعریف می‌شوند [۴]:

$$\varepsilon_{\parallel} \approx \varepsilon_d + \frac{i\sigma_{\parallel}}{\omega\varepsilon_0 t_{eff}}, \quad \varepsilon_{\perp} \approx \frac{i\sigma_{\perp}}{\omega\varepsilon_0 t_{eff}}. \quad (4)$$

مطابق شکل ۱ نور فرودی با قطبش دایروی، از محیط اول به محیط دوم در جهت محور z برگرافن می‌تابد. در این راستا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به صورت زیر معرفی می‌شوند [۵]:

$$\vec{E}_{R(L)}^-(\vec{r}, t) = \hat{R}(\hat{L})E_{02(04)}e^{i(\omega t + k_z z)}, \quad (5)$$

مقدمه

چندین دهه است که جاذب‌ها در ناحیه تراهرتز به علت کاربرد در سنسورها، ارتباطات نوری، تصویربرداری زیستی و آشکارسازی توجه زیادی را جلب کرده‌اند. جاذب کامل دستگاهی است که تابش فرودی در ناحیه کاری را به‌طور کامل جذب کند به طوری که تمامی امواج الکترومغناطیسی انتشاری ناکارآمد شوند. مناطق طیفی کم انرژی، به ویژه مادون قرمز و تراهرتز فاقد مواد مناسب برای جذب مؤثر و کارآمد نور هستند [۱]. گرافن یکی از کاندیدهای بسیار مناسب برای طراحی جاذب‌های تنظیم‌پذیر در ناحیه فرکانسی تراهرتز است [۲]. گرافن لایه‌ای از اتم‌های کربن است که در یک ساختار شش وجهی در کنار هم قرار دارند و قابلیت تنظیم خواص نوری و الکتریکی با تغییر میدان الکتریکی و یا پتانسیل شیمیایی را دارد [۱]. در این مقاله با استفاده از پاسخ متفاوت گرافن تحت تأثیر میدان مغناطیسی برای نورهای راست‌گرد و چپ‌گرد دایروی جاذبی مبتنی بر گرافن و حساس به قطبش دایروی پیشنهاد می‌شود.

مدل ساختار و روش محاسباتی

شکل ۱ به‌طور شماتیک ساختار جاذب گرافنی حساس به قطبش دایروی راست‌گرد (RCP) و چپ‌گرد (LCP) را نشان می‌دهد. ساختار جاذب پیشنهادی، متشکل از گرافن روی یک زیرلایه دی‌الکتریک که یک لایه بدون جذب و غیرمغناطیسی است، قرار دارد. ترکیب گرافن و زیر لایه در نهایت روی یک لایه از فلز مس به عنوان صفحه منعکس کننده برای جلوگیری از عبور نور استفاده شده است. فرض می‌کنیم که کل ساختار توسط هوا احاطه شده و نور فرودی با قطبش دایروی و در جهت محور z انتشار پیدا می‌کند. یک میدان مغناطیسی خارجی عمود در امتداد محور z بر ساختار اعمال می‌شود.

(لایه n_3) ضرایب عبور، بازتاب و جذب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$T_{R(L)} \equiv 0, \quad (15)$$

$$R_{R(L)} = |r_{R(L)}|^2. \quad (16)$$

در نهایت باتوجه به قانون پایستگی انرژی میزان جذب کل ساختار با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A_{R(L)} = 1 - R_{R(L)}. \quad (17)$$

در ادامه با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) به بررسی طیف‌های بازتاب و جذب ساختار می‌پردازیم.

نتایج و مباحث

برای بررسی جذب و بازتاب نور RCP و LCP در ساختار جاذب پیشنهادی، در بازه‌ی فرکانسی ۱۰ THZ - ۰/۱ و تحت میدان‌های مغناطیسی مختلف ۰-۷T پارامترهای اولیه (هوا) $n_1 = 1$ ، زیرلایه گرافن (SiC) $n_d = \sqrt{\epsilon_d} = 3.5$ ، با ضخامت $d_2 = 5 \mu m$ ، لایه سوم فلز مس با ضریب شکست $n_3 = \sqrt{-1.7 \times 10^5 + 1.1i \times 10^6} v^{-1}$ انتخاب می‌شوند [۶]. برای گرافن $\mu = 0.5 m^2 / Vs$ ، $n_s = 10^{17} m^{-2}$ و $v_F = 10^6 m / s$ در نظر می‌گیریم.

شکل ۲ رفتار طیف بازتابی و جذب RCP و LCP را برای ساختار پیشنهادی در بازه فرکانسی ۱۰ THZ - ۰/۱ را به ازای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود طیف RCP بازتاب کامل‌تری را در محدوده فرکانسی ۳/۵-۴/۵ THZ نمایش می‌دهد در حالی که طیف LCP بازتاب کم‌تری را به ازای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی در محدوده فرکانسی ذکر شده نشان می‌دهد.

طیف جذب RCP و LCP در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که طیف LCP جذب کامل‌تری را در میدان‌های مغناطیسی بزرگ‌تر از ۴T نمایش می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی شدت جذب LCP افزایش می‌یابد. در حالی که برای نور RCP میزان جذب ضمن این‌که مقدار کم‌تری را نشان می‌دهد

$$\vec{E}_{R(L)}^+(\vec{r}, t) = \hat{R}(\hat{L}) E_{01(03)} e^{i(\omega t - k_z z)}, \quad (6)$$

$$\vec{H}_{R(L)}^-(\vec{r}, t) = \hat{R}(\hat{L}) \frac{-ik_z}{\mu\omega} E_{02(04)} e^{i(\omega t + k_z z)}, \quad (7)$$

$$\vec{H}_{R(L)}^+(\vec{r}, t) = \hat{R}(\hat{L}) \frac{-ik_z}{\mu\omega} E_{01(03)} e^{i(\omega t - k_z z)}, \quad (8)$$

که در آن $\hat{R}(\hat{L}) = \hat{x}^+ (-) \hat{y}^- / \sqrt{2}$ و علامت‌های "+" و "-" به ترتیب بیان‌گر نور فرودی در راستای محور z و نور بازتابی در خلاف جهت محور z است. $k_z = n_1 \omega / c$ نمایان‌گر بردار انتشار نور در محیط i-ام و n_i ضریب شکست محیط است که برای گرافن روی زیر لایه طبق نظریه محیط مؤثر $N_2 = \sqrt{\epsilon_{\parallel} + i\epsilon_{\perp}}$ تعریف می‌شود. C، سرعت نور در خلا است. باتوجه به پیوستگی میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی، با اعمال شرایط مرزی $\hat{n}_{12} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0$ و $\hat{n}_{12} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = 0$ در $z = 0$ داریم:

$$E_{01(03)}^1 + E_{02(04)}^1 = E_{01(03)}^2 + E_{02(04)}^2, \quad (9)$$

$$N_2^{R(L)} (E_{02(04)}^2 - E_{01(03)}^2) = n_1 (E_{02(04)}^1 - E_{01(03)}^1), \quad (10)$$

از پیوستگی میدان‌ها در $z = d$ نیز خواهیم داشت:

$$E_{01(03)}^2 e^{-ik_2^{R(L)} d} + E_{02(04)}^2 e^{ik_2^{R(L)} d} = E_{01(03)}^3, \quad (11)$$

$$N_2^{R(L)} E_{01(03)}^2 e^{-ik_2^{R(L)} d} - N_2^{R(L)} E_{02(04)}^2 e^{ik_2^{R(L)} d} = n_3 E_{01(03)}^3, \quad (12)$$

با جداسازی شرایط مرزی بر حسب نور RCP و LCP به نتایج زیر می‌رسیم که در تطابق کامل با روش ارائه شده توسط ویسنوسکی است [۵]:

$$r_{R(L)} = \frac{\cos(k_2^{R(L)} d) (1 - \frac{n_3}{n_1}) - i \sin(k_2^{R(L)} d) (\frac{n_3}{N_2^{R(L)}} - \frac{N_2^{R(L)}}{n_1})}{\cos(k_2^{R(L)} d) (1 + \frac{n_3}{n_1}) - i \sin(k_2^{R(L)} d) (\frac{N_2^{R(L)}}{n_1} + \frac{n_3}{N_2^{R(L)}})}, \quad (13)$$

$$t_{R(L)} = \frac{2}{\cos(k_2^{R(L)} d) (1 + \frac{n_3}{n_1}) - i \sin(k_2^{R(L)} d) (\frac{N_2^{R(L)}}{n_1} + \frac{n_3}{N_2^{R(L)}})}. \quad (14)$$

در معادلات فوق با توجه به حضور فلز مس در ساختار

بازتاب کننده مقدار تراگسیل نورهای چپ‌گرد و راست‌گرد
 دایروی مقدار چشم‌گیری نشان نمی‌دهند.

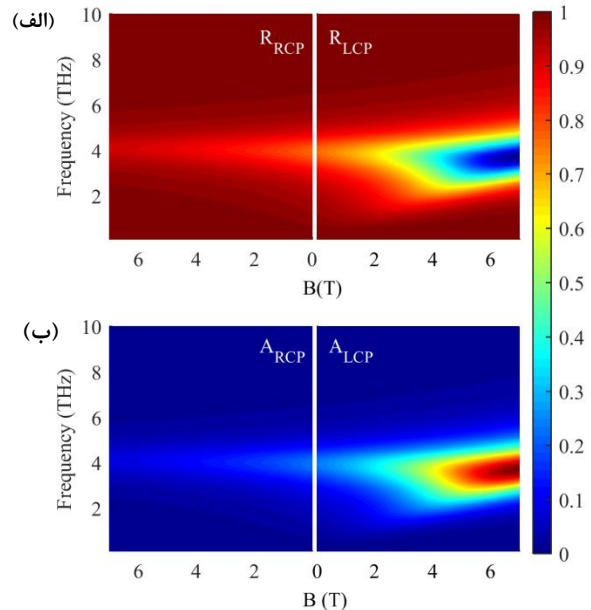
نتیجه گیری

در ابتدا رفتار طیف بازتاب و جذب نور با قطبش‌های
 دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد به ازای مقادیر مختلف میدان
 مغناطیسی رسم شد. نتایج نشان داد که در یک بازه
 فرکانسی خاص تحت میدان مغناطیسی بزرگ‌تر از ۴T نور
 با قطبش چپ‌گرد دایروی ۹۹٪ جذب و نور با قطبش
 دایروی راست‌گرد به‌طور عمده بازتاب پیدا می‌کند. با توجه
 به این نتیجه جاذب گرافنی حساس به قطبش دایروی را
 برای یک فرکانس خاص ارائه دادیم.

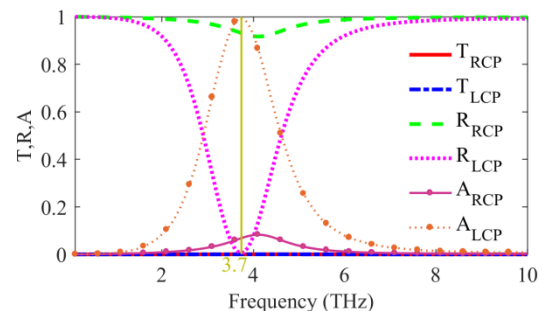
مرجع‌ها

- [1] M. Wang, E.H. Yang, "THz applications of 2D materials: Graphene and beyond", Nano-Struct. Nano-Objects., Vol. 15, pp. 107-113, 2018.
- [2] M.S. Ukhtary, E.H. Hasdeo, A.R. Nugraha, R. Saito, "Fermi energy-dependence of electromagnetic wave absorption in graphene", Appl. Phys. Express., Vol. 8, No. 5, p. 055102, 2015.
- [3] D.L. Sounas, C. Caloz, "Gyrotropy and nonreciprocity of graphene for microwave applications", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 60, No. 4, p. 901-914, 2012.
- [4] W. Zhu, F. Xiao, M. Kang, D. Sikdar, M. Premaratne, "Tunable terahertz left-handed metamaterial based on multi-layer graphene-dielectric composite", Appl. Phys. Lett., Vol. 104, No. 5, pp. 051902, 2014.
- [5] Š.Višňovský, Optics in magnetic multilayers and nanostructures, p.175, Crc Press, 2018.
- [6] Y.S. Lee, Principles of terahertz science and technology, p. 169, Springer Science & Business Media, 2009.

با افزایش میدان مغناطیسی مقدار آن کاهش می‌یابد.



شکل ۲: طیف‌های (الف) بازتاب، (ب) جذب برای نورهای دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد برحسب فرکانس و میدان‌های مغناطیسی مختلف.



شکل ۳: طیف تراگسیل، بازتاب و جذب برای نورهای دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد به ازای $B=7T$.

با توجه به نمودارهای ۲ (الف) و ۲ (ب) برای دستیابی
 به جذب کامل برای نورهای RCP و LCP طیف باتازب،
 جذب و تراگسیل را به ازای میدان مغناطیسی ۷ T به
 عنوان تابعی از فرکانس نور فرودی رسم می‌کنیم (شکل ۳).
 مشاهده می‌شود که در فرکانس ۳/۷ THz برای نور LCP
 جذب ۹۹٪ و بازتاب مکمل نزدیک به صفر داریم این در
 حالی است که در فرکانس مذکور برای نور RCP جذب
 بسیار کم و بازتاب ۹۶٪ مشاهده می‌شود. از طرفی طبق
 انتظار به علت استفاده از فلز نیم‌بی‌نهایت به عنوان لایه