

## مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

### فیلتر قطبش دایروی در ناحیه‌ی تراهرتز بر پایه گرافن تک لایه

عبدی قلعه، رضا<sup>۱</sup>؛ عیوضی، لیدا<sup>۱</sup>؛ مدنی، امیر<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی، ایران

#### چکیده

در این مقاله، خواص زیروتروپی گرافن تک لایه تحت تاثیر میدان مغناطیسی برای امواج الکترومغناطیسی فرودی با فرکانس‌های تراهرتز بررسی شده است. با استفاده از ماتریس انتقال  $E \times E$ ، طیف‌های بازتاب و عبور برای قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که ساختار بررسی شده امکان فیلتر کردن قطبش دایروی در ناحیه‌ی تراهرتز را فراهم می‌سازد.

#### مقدمه

در دهه‌های اخیر توسعه‌ی تکنولوژی تراهرتز با توجه به کاربردهای وسیعی که در زمینه‌ی زیست حسگرها، تصویربرداری و تحقیقات پزشکی می‌تواند داشته باشد، مورد توجه قرار گرفته است [۱]. محققان برای طراحی و ساخت ادوات تراهرتز ایده‌ی استفاده از مواد نوظهوری همچون متامواد و گرافن را مطرح نموده‌اند [۲]. گرافن به عنوان محیطی دو بعدی که از شبکه‌ی کربنی هگزاگونال با ضخامت یک اتم تشکیل شده است، خواص الکترونی و اپتیکی ویژه‌ای دارد [۳]. به تازگی نشان داده شده است که گرافن وقتی تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، مانند مواد مگنتوآپتیکی از خود خواص زیروتروپی نشان می‌دهد و خواص زیروتروپی نیز در طراحی و ساخت ایزولاتورها و سیرکیولاتورها می‌تواند کاربرد داشته باشند [۴]. ما در این مقاله، خاصیت زیروتروپی و ویژگی‌های غیربازگشتی گرافن تک لایه را در حضور میدان مغناطیسی و در ناحیه‌ی تراهرتز بررسی نموده‌ایم و رفتار قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد امواج فرودی بر روی گرافن را مطالعه می‌نماییم.

#### پارامترهای گرافن تک‌لایه تحت میدان مغناطیسی خارجی

گرافن تک لایه با اعمال میدان مغناطیسی عمود بر سطح آن، خاصیت زیروتروپی پیدا می‌کند و می‌تواند با یک تانسور گذردهی الکتریکی نامتقارن توصیف شود:

$$\vec{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & i\epsilon_{xy} & 0 \\ -i\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

که در آن  $\epsilon_{xx}$  المان قطری ۱۱ و ۲۲ و  $\epsilon_{zz}$  المان قطری ۳۳ می‌باشد. همچنین المان‌های غیرقطری ۱۲ و ۲۱ با  $\pm i\epsilon_{xy}$  نشان داده می‌شود. این المان‌های غیرقطری ناشی از اعمال میدان مغناطیسی می‌باشند. المان‌های قطری و غیر قطری تانسور گذردهی گرافن در ناحیه‌ی تراهرتز تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی با روابط زیر داده می‌شوند [۵]:

## مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{inter} - \frac{\omega_p^2(\omega+i\gamma)}{\omega((\omega+i\gamma)^2+\omega_c^2)} \quad (۲)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{-\omega_p^2(\omega_c)}{\omega((\omega+i\gamma)^2-\omega_c^2)} \quad (۳)$$

و در آن  $\epsilon_{inter}$  با استفاده از مدل درود به صورت زیر

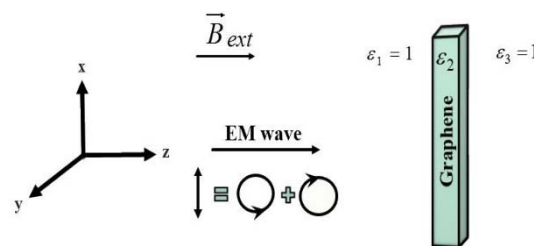
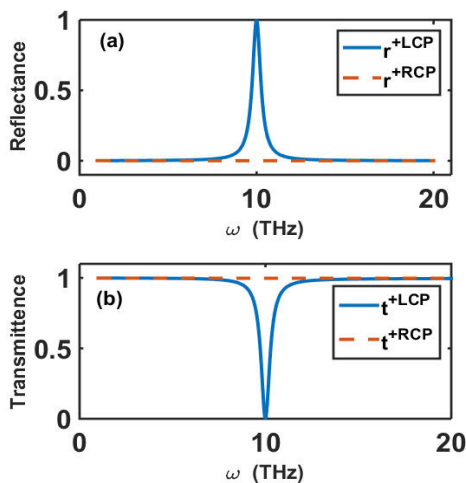
$$\epsilon_{inter} = 1 + \frac{i\sigma_{inter}}{\omega\epsilon_0 d} \quad (۴)$$

تعریف می‌شود [۶،۷]. در روابط فوق  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $d$  ضخامت گرافن،  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی الکتریکی خلا،  $\omega_c$  فرکانس سیکلوترون،  $\omega_p$  فرکانس پلاسمایی  $\gamma$  ضریب میرایی و  $\sigma_{inter}$  نیز رسانندگی گرافن در گذار بین ترازهای لایه‌ی ظرفیت و رسانش می‌باشد. ما برای مطالعه‌ی خاصیت غیربازگشتی در گرافن، لایه‌ای از گرافن را در نظر گرفته‌ایم که در محیط خلا قرار داشته باشد. ساختار حاصل را می‌توان به صورت سه لایه در نظر گرفت که لایه‌های کناری نامتناهی و دارای ضریب گذردهی  $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 1$  می‌باشد و لایه‌ی مرکزی گرافن با ضخامت  $d$  باشد. صفحات ساختار را عمود بر محور  $\bar{z}$  انتخاب کرده و فرض می‌کنیم که میدان مغناطیسی خارجی و بردار انتشار موج الکترومغناطیسی نیز در راستای  $\bar{z}$  باشد (شکل ۱). برای انجام محاسبات از روش ماتریس انتقال  $4 \times 4$  بهره گرفته‌ایم که جزئیات آن در مراجع [۷] در دسترس می‌باشد.

### نتایج و بحث‌ها

در ابتدا فرض کرده‌ایم که  $\mu_c = 0.5eV$ ،  $T = 300K$  و  $B = +1\text{Tesla}$  باشد. همچنین فرکانس پلاسمایی را  $\omega_p/2\pi = 410\text{THz}$ ، فرکانس سیکلوترون  $\omega_c = 10\text{THz}$  و ضریب میرایی را  $\gamma = 0$  در نظر می‌گیریم.

در ادامه، موج الکترومغناطیسی را با قطبش خطی در نظر می‌گیریم که بر ساختار سه لایه به صورت عمود فرود می‌آید. از آنجایی که قطبش خطی را می‌توان به قطبش‌های راستگرد و چپگرد تجزیه نمود، رفتار ضرایب عبور و بازتاب این قطبش‌های دایروی را از ساختار سه لایه‌ای با استفاده از روش ماتریس انتقال  $4 \times 4$  و به ازای  $d = 1\text{nm}$  محاسبه نموده و در شکل ۲ نمایش داده‌ایم.



شکل ۱: ساختار سه لایه‌ای تحت میدان مغناطیسی خارجی که در معرض تابش موج الکترومغناطیسی قرار گرفته است.

شکل ۲: طیف بازتاب (a) و عبور (b)

پرتوهای قطبیده‌ی دایروی

## مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

راستگرد (خط چین) و چپگرد (خط ممتد) موج الکترومغناطیسی  
از ساختار مورد مطالعه.

همان‌طور که در شکل ۲(a) مشاهده می‌شود، ضریب بازتاب قطبش راستگرد ( $r^{+RCP}$ ) در فرکانس  $\omega = \omega_c$  صفر می‌باشد. در حالی که، ضریب بازتاب قطبش چپگرد ( $r^{+LCP}$ ) در همان فرکانس به یک می‌رسد. در شکل ۲(b) نیز مشاهده می‌شود که ضریب عبور قطبش راستگرد ( $t^{+RCP}$ ) در فرکانس  $\omega = \omega_c$  یک و ضریب عبور قطبش چپگرد ( $t^{+LCP}$ ) در همین فرکانس صفر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر موج الکترومغناطیسی در فرکانس  $\omega = \omega_c$  و قطبش خطی روی این ساختار فرود آید مولفه‌ی مربوط به قطبش راستگرد به طور کامل از ساختار عبور می‌کند. در صورتی که مولفه مربوط به قطبش چپگرد از ساختار به طور کامل بازتابیده می‌شود. همچنین با توجه به طیف‌های بدست آمده در شکل ۲، خاصیت فیلتری این ساختار نیز به خوبی نمایان است. به عبارت دیگر اگر باریکه‌ای از امواج با طیف فرکانسی پیوسته روی ساختار فرود آید، بازتاب کامل فقط برای امواجی با فرکانس  $\omega = \omega_c$  با پهنای فرکانسی اندک رخ می‌دهد.

### نتیجه گیری

در این مقاله، ضرایب عبور و بازتاب را در فرکانس ناحیه‌ی تراهرتز مورد مطالعه قرار دادیم. نتایج ما نشان می‌دهد که گرافن تک لایه تحت میدان مغناطیسی، در جهت انتشار  $+\bar{z}$ ، فقط یکی از پرتوهای قطبیده‌ی دایروی را عبور می‌دهد. با توجه به طیف عبور و بازتاب ساختار مطالعه شده، می‌توان انتظار داشت که این ساختار بتواند به عنوان فیلتر قطبش دایروی در ناحیه‌ی تراهرتز مورد استفاده قرار گیرد.

### مرجع‌ها

- [1] B. Ferguson, X. C. Zhang; "Materials for terahertz science and technology"; Nature Mater., **1**, (2002) 26-33.
- [2] W. Zhu, F. Xiao, M. Kang, D. Sikdar, M. Premaratne; "Tunable terahertz left-handed metamaterial based on multi-layer graphenedielectric composite". Appl. Phys. Lett. **104**, (2014), 051902.
- [3] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov; "Electric field effect in atomically thin carbon films"; Science **306**, (2004), 666-669.
- [4] N. Ubrig, I. Crassee, J. Levallois, I. O. Nedoliuk, F. Fromm, M. Kaiser, T. Seyller, A. B. Kuzmenko, "Fabry-Perot enhanced Faraday rotation in graphene"; Appl. Phys. Lett. **98**, (2011), 261915.
- [5] V. P. Gusynin and S. G. Sharapov, J. P Carbotte; "Magneto-optical conductivity in gaphene"; J. Phys.; Condens. Matter **19**, (2007), 026222.
- [6] G. W. Hanson; "Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene"; J. Appl. Phys. **103** (2008), 064302.
- [7] H. Kato, T. Matsushita, A. Takayama, M. Egawa, K. Nishimura, M. Inoue, "Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals"; J. Appl. Phys. **93**, (2003) 3906-3911.