

## خواص اپتیکی محیط نیمه نامحدودی شامل متامواد هذلولوی گرافن پایه با محور نوری مورب

شادی رضایی و صمد روشن انتظار

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

پست الکترونیکی: sh.rezaei94@ms.tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۱۲/۲۳)

### چکیده

در این مقاله، خواص اپتیکی محیط نیمه نامحدودی شامل متامواد هذلولوی گرافن پایه با محور نوری مورب نسبت به مرز آن با هوا، با استفاده از معادلات ماکسول و روش تقریب محیط مؤثر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داد که سمت گیری لایه‌های ساختار (ناهمسانگردی القا شده هندسی)، طیف‌های ناشی از قطبش عرضی مغناطیسی را در ناحیه‌ای که ساختار پاشندگی هذلولوی از خود نشان می‌دهد، تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین در ناحیه بسامدی بزرگی که محیط پاشندگی هذلولوی دارد، که به علت حضور گرافن است، انتقال از ساختار به صفر می‌رسد، که با افزایش زاویه کج شدگی لایه‌ها نسبت به مرز، به تدریج کاهش پیدا می‌کند و در نهایت ناپدید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: متامواد هذلولوی، گذردهی الکتریکی، تراوایی مغناطیسی، ماتریس انتقال

### ۱. مقدمه

بخشیدن به عملکردهای مفید از آنها استفاده کرد. مطالعه‌های اولیه بر روی متامواد عمدتاً روی ساختارهایی با گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی منفی متمرکز بوده است. نوع جدیدی از محیط‌های متامواد که پاشندگی هذلولوی (یا نامحدود) دارند، شدیداً ناهمسانگرد هستند. در این نوع از متامواد، یکی از درایه‌های اصلی تانسورهای گذردهی الکتریکی یا تراوایی مغناطیسی، با دیگر درایه‌های اصلی، علامت مخالف دارد و به علت مختلف‌العلامت بودن این درایه‌ها، معادله سطح بسامدی به صورت هذلولوی خواهد بود. به این نوع از متامواد، متامواد هذلولوی گفته می‌شود که یکی از غیرمعمول‌ترین انواع

متامواد، مواد مصنوعی جدید با خواص الکترومغناطیسی غیرمعمول هستند که در مواد طبیعی یافت نمی‌شوند. همه مواد طبیعی مثل شیشه، الماس و... دارای گذردهی الکتریکی، تراوایی مغناطیسی و ضریب شکست مثبت هستند. متامواد الکترومغناطیسی، محیط‌های ساختگی هستند که توسط عناصر ریزطول موج به وجود می‌آیند. این مواد در کنترل انتشار نور و مهندسی الکترومغناطیسی فضا مفید هستند [۱]. از آنجایی که این مواد خواص الکترومغناطیسی غیرعادی را نمایش می‌دهند که در طبیعت یافت نمی‌شوند، می‌توان در تحقق

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، هدف از این مقاله بررسی و تحلیل خواص اپتیکی محیط نیمه نامحدود متامواد هذلولوی گرافن پایه حاوی ناهمسانگردی هندسی القا شده است. بدین منظور محیطی شامل لایه‌های متناوب دی‌الکتریک و گرافن، که لایه‌های آن نسبت به مرزها زاویه معینی داشته باشند (ناهمسانگردی هندسی) در نظر گرفته شده است. با استفاده از معادلات ماکسول و شرایط پیوستگی در مرز محیط‌ها و به کار بردن روش تقریب محیط مؤثر برای محیط شامل نانولایه‌های متناوب گرافن و دی‌الکتریک، خواص اپتیکی آن بررسی شده است. نشان داده شده است که در طیف انتقال محیط متامواد هذلولوی گرافن پایه با محور نوری مورب، برای قطبش  $TM$  تغییراتی ایجاد می‌شود، که وابسته به زاویه کج شدگی محور نوری است. همچنین، محدوده بسامدی بزرگی بدون انتقال در ساختار همسانگرد شامل گرافن به وجود آمده است، که با اعمال ناهمسانگردی القا شده و افزایش آن کاهش پیدا کرده است و در زوایای ناهمسانگردی بالا، به تدریج محو شده است. همچنین این ناحیه بسامدی با افزایش پتانسیل شیمیایی نانولایه‌های گرافن افزایش می‌یابد.

## ۲. ساختار و روش

ساختار مورد بررسی، یک محیط تناوبی نیمه نامحدود شامل لایه‌های تناوبی دی‌الکتریک و گرافن است که محیط متامواد هذلولوی گرافن پایه نامیده شده است و در محیطی معمولی با ضریب شکست ثابت  $n$  قرار گرفته است؛ لایه‌های گرافن و دی‌الکتریک نسبت به مرز محیط معمولی کج قرار گرفته‌اند. همچنین، در تمامی محاسبات از اتلاف نانولایه‌های گرافن چشم پوشی شده است. مطابق با شکل ۱ نانولایه‌های گرافن با ضخامت  $d_G$  توسط لایه‌های دی‌الکتریک با ضخامت  $d_S$  و گذردهی الکتریکی  $\epsilon_S$ ، جدا می‌شوند. چون گذردهی الکتریکی نانولایه‌های گرافن برای میدان الکتریکی عمود و

تمام‌مواد مغناطیسی هستند [۲-۵]. از جمله کاربردهای مهم تمام‌مواد می‌توان به فیلترهای نوری، دستگاه‌های پزشکی، کاربردهای هوافضا از راه دور، حسگرها، مدیریت هوشمند انرژی خورشیدی و... اشاره کرد. از دیگر کاربردهای مهم تمام‌مواد در اپتیک، ساخت لنزها است. با تمام‌مواد می‌توان لنزهایی ساخت که توانایی تمرکز بر روی ویژگی‌هایی کوچک‌تر از طول موج نور خود را داشته باشند. همچنین با توجه به این ویژگی می‌توان از تمام‌مواد در ابزارهای پزشکی برای مشاهده سلول‌های کوچک استفاده کرد [۶]. با توجه به این خواص متنوع و کاربردهای زیادی که تمام‌مواد دارند، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند برای مثال لیو و همکاران، سرعت‌گروه فرانوری<sup>۱</sup> و رابطه پاشندگی تمام‌مواد ناهمسانگرد مبنی بر شرط مرزی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که انتشار فرا نوری توسط رابطه پاشندگی هذلولوی وابسته به تمام‌مواد ناهمسانگرد، القا می‌شود [۷]. ساکلی و همکاران، انتشار نور در موجبر مربعی پر شده با تمام‌مواد ناهمسانگرد را با استفاده از روش عملگر عرضی، مورد بررسی قرار دادند. آنها معادله موج و رابطه‌های پاشندگی مربوط به مدهای هدایت شده و محو شونده درون موجبر را به دست آوردند و به تحلیل آن پرداختند. نتایج عددی که آنها به دست آوردند با پیش‌بینی‌های تئوری قابل مقایسه بود [۸].

ساختارهای دوره‌ای و بلورهای فوتونی یک بعدی شامل تمام‌مواد هذلولوی، به علت خواص غیرمتداولی که در ساختار تمام‌مواد هذلولوی وجود دارد کاربردهای متنوعی دارند و در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند [۹-۱۱]. کامپیونی و همکاران، خواص پاشندگی تمام‌مواد هذلولوی نیم‌رسانا را در بسامدهای میانه فرسرخ و تمام‌مواد هذلولوی فلزی در بسامدهای مرئی را با به کار بردن روش تقریب محیط مؤثر و نظریه بلوخ با هم مقایسه کردند [۱۲]. اخیراً نیز خواص اپتیکی بلورهای فوتونی حاوی تمام‌مواد هذلولوی گرافن پایه توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳-۱۶]. سالکی و همکاران خواص اپتیکی بلور فوتونی یک بعدی شامل تمام‌مواد

<sup>۱</sup> Superluminal group velocity

می توان برای محیط تمامواد هذلولوی گرافن پایه حاوی ناهمسانگردی القا شده هندسی، از تقریب محیط مؤثر همگن استفاده کرد و تانسور گذردهی الکتریکی ناهمسانگرد محیط تمامواد هذلولوی شامل نانولایه های گرافن و دی الکتریک را در سیستم مختصات اصلی  $(x', y', z')$  به صورت رابطه (۳) تعریف کرد

$$\epsilon'_{effGHMM} = \begin{pmatrix} \epsilon'_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon'_{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon'_{\perp} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

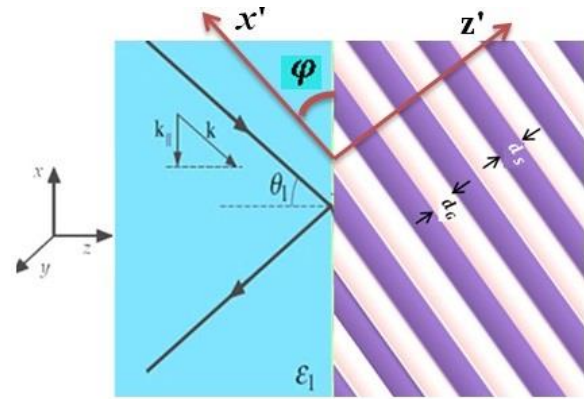
که در آن درایه روی قطر مقادیر مؤثر می باشند که عبارتند از:

$$\epsilon'_{\perp} = \left( \frac{f_G}{\epsilon'_G} + \frac{f_S}{\epsilon'_S} \right)^{-1} \quad \epsilon'_{\parallel} = f_G \epsilon''_G + f_S \epsilon''_S,$$

در این رابطه  $\epsilon'_{\parallel}$  و  $\epsilon'_{\perp}$  به ترتیب درایه موازی و عمودی، تانسور گذردهی الکتریکی نسبت به فصل مشترک نانولایه های گرافن هستند.

همچنین، فرض شده است که محیط تمامواد هذلولوی گرافن پایه، محیطی غیرمغناطیسی با تراوایی مغناطیسی واحد است. فرض شده است موج با قطبش TM (میدان مغناطیسی موازی با محور  $y$ )، با زاویه تابش  $\theta$  نسبت به محور  $z$  بر ساختار لایه ای نشان داده شده در شکل ۱، فرود آید. محور  $z$  بر فصل مشترک لایه ها عمود است. به علاوه، فرض شده است که محور اپتیکی ساختار در صفحه  $x-z$  باشد و با محور  $z$  زاویه  $\varphi$  را بسازد (به اندازه زاویه  $\varphi$  کج شده است). بنابراین تانسور گذردهی الکتریکی در مختصات  $(xyz)$  (مختصات آزمایشگاهی) دیگر قطری نیست و توسط رابطه های (۴) و (۵) نمایش داده می شوند

$$\epsilon'_{GHMM} = \begin{pmatrix} \epsilon'_{xx} & 0 & \epsilon'_{xz} \\ \epsilon'_{zx} & \epsilon'_{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon'_{zz} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \epsilon'_{xx} &= \epsilon'_{\parallel} \cos^2 \varphi + \epsilon'_{\perp} \sin^2 \varphi, \\ \epsilon'_{zz} &= \epsilon'_{\parallel} \sin^2 \varphi + \epsilon'_{\perp} \cos^2 \varphi, \\ \epsilon'_{xz} &= \epsilon'_{zx} = (\epsilon'_{\perp} - \epsilon'_{\parallel}) \sin \varphi \cos \varphi, \end{aligned} \quad (5)$$


شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) بازتاب و شکست موج  $p$  (TM) در مرز بین محیط عادی (هوا یا دی الکتریک) و تمامواد هذلولوی گرافن پایه ای که محور نوری آن کج شده باشد.

موازی با ورقه گرافن متفاوت است، تانسور گذردهی الکتریکی مؤثر نانولایه های گرافن به صورت رابطه (۱) نمایش داده می شود

$$\epsilon'_G = \begin{pmatrix} \epsilon''_G & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon''_G & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon''_{\perp G} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

که در آن،  $\epsilon''_G = 1 + \frac{i\eta_0 \sigma_G}{d_G k_0}$  و  $\epsilon''_{\perp G} = 1$  به ترتیب درایه های واقع در صفحه و خارج از صفحه گذردهی الکتریکی می باشند [۱۷-۱۹].  $\eta_0$  امپدانس هوا و  $k_0 = 2\pi/\lambda$  بردار موج خلأ، است.  $\sigma_G$  رسانندگی سطح گرافن است که می تواند توسط فرمول کوبو به صورت  $\sigma_G = \sigma_G^{intra} + \sigma_G^{inter}$  بیان شود، که شامل دو سهم داخل بانندی و بین بانندی به صورت رابطه (۲) می باشد

$$\begin{aligned} \sigma_G^{intra} &= \frac{e^2}{4\hbar} \frac{i}{2\pi} \left\{ \frac{1}{\hbar\omega} \ln \left( \cosh \left( \frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right) \right\}, \\ \sigma_G^{inter} &= \frac{e^2}{4\hbar} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega - 2\mu_c}{2k_B T} \right. \\ &\quad \left. - \frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar\omega + 2\mu_c)^2}{(\hbar\omega - 2\mu_c)^2 + (2k_B T)^2} \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن،  $e$  بار الکترون،  $T$  دمای مطلق،  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $\mu_c$  پتانسیل شیمیایی است [۱۹].

در این بررسی، چون ضخامت نانولایه های گرافن در مقایسه با طول موج تابش الکترومغناطیسی کوچک است،

محور نوری مورب است، رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\alpha_1 = \frac{\epsilon_{xz}}{\epsilon_{zz}} k_x \quad \beta_{1,2} = \alpha_1 \pm \alpha_r, \quad (10)$$

$$\alpha_r = \left( \frac{\omega}{c} \right) \sqrt{\epsilon'_{\parallel} \epsilon'_{\perp} (\epsilon_{zz} - n^2 \sin^2 \theta) / \epsilon_{zz}^2}, \quad (11)$$

بنابراین مؤلفه‌های بردار موج، امواج عادی که به سمت بالا و پایین فصل مشترک انتشار پیدا می‌کنند با هم متفاوت‌اند که از مورب بودن محور نوری و غیر صفر بودن  $k_x$  نتیجه می‌شوند. در نتیجه می‌توان بردار میدان مغناطیسی کلی را به صورت رابطه (۱۲) نوشت:

$$\mathbf{H} = \hat{e}_y e^{i(k_x x - \omega t)} e^{-i\alpha_r z} (H_r e^{i\alpha_r z} + H_t e^{-i\alpha_r z}) \quad (12)$$

که در آن  $H_r$  و  $H_t$  به ترتیب دامنه امواج عبوری و بازتابی، در محیط متمامواد هذلولوی گرافن پایه می‌باشند. با قراردادن رابطه

$$(12) \text{ در معادله ماکسول } \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \text{ و به کار بردن رابطه‌های}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = ik_x \text{ و } \frac{\partial}{\partial t} = -i\omega$$

میدان الکتریکی هم به دست می‌آید.

برای قطبش TE (بردار میدان الکتریکی عمود بر صفحه تابش) هم

$$\text{با در نظر گرفتن میدان الکتریکی به صورت } \mathbf{E} = E_y(z) e^{i(k_x x - \omega t)} \hat{e}_y$$

میدان قطبش TM روابط (۱۳) و (۱۴) برای معادله موج و میدان

الکتریکی به دست می‌آید

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + \gamma_1 \frac{\mu_{xz}}{\mu_{zz}} k_x \frac{dE_y}{dz} + \left( \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\mu'_{\perp} \mu'_{\parallel} \epsilon'_{\parallel}}{\mu_{zz}} - \frac{\mu_{xx}}{\mu_{zz}} k_x^2 \right) E_y = 0, \quad (13)$$

$$\mathbf{E} = \hat{e}_y e^{i(k_x x - \omega t)} e^{-i\alpha_{rs} z} (E_r e^{i\alpha_{rs} z} + E_t e^{-i\alpha_{rs} z}), \quad (14)$$

در روابط بالا  $E_r$  و  $E_t$  دامنه امواج عبوری و بازتابی در

محیط متمامواد هذلولوی می‌باشند.  $\alpha_{rs}$ ،  $\alpha_{1s}$  و  $q_{Ds}$  برای

قطبش TE (یا موج قطبیده شده s)، به صورت رابطه (۱۵)

تعریف می‌شوند:

$$\alpha_{rs} = \left( \frac{\omega}{c} \right) \sqrt{\epsilon'_{\parallel} (\mu_{zz} - \mu'_{\perp} \mu'_{\parallel} n^2 \sin^2 \theta) / \mu_{zz}^2} \quad \alpha_{1s} = \frac{\mu_{xz}}{\mu_{zz}} k_x, \quad (15)$$

$$q_{Ds} = \alpha_{rs} \mu_{zz} / (\mu_{\parallel} \omega \mu'_{\perp}),$$

که در آن می‌توان  $\mu'_{\parallel}$ ،  $\mu'_{\perp}$  و  $\mu_{zz}$  را برابر یک در نظر گرفت؛

چون همان‌طور که قبلاً ذکر شد فرض شده است که محیط

که این روابط از طریق فرمول‌بندی مربوط به دوران که مؤلفه‌های بردار در دو دستگاه دوران یافته و ثابت را به هم مربوط می‌کند به دست آمده است [۲۰].

با استفاده از معادلات ماکسول و تانسور گذردهی الکتریکی

که در بخش قبل بیان شد، معادله موج و میدان‌های الکتریکی و

مغناطیسی برای زمانی که امواج با قطبش TM، تحت زاویه  $\theta$

برایه‌های متمامواد هذلولوی گرافن پایه با محور نوری مورب،

فرود می‌آیند قابل محاسبه‌اند. با قرار دادن معادله‌های (۴) و (۵)

در معادلات ماکسول رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \overline{\epsilon_{GHMM}} \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \epsilon_0 = \nabla \times \mathbf{H} \overline{\epsilon_{GHMM}}^{-1},$$

که در آن،  $\overline{\epsilon_{GHMM}}$  با وارون کردن  $\epsilon_{GHMM}$  به دست می‌آید. با کرل

گرفتن از طرفین معادله (۶)، رابطه (۷) به دست می‌آید

$$\nabla \times \overline{\epsilon_{GHMM}}^{-1} \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \nabla \times \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (7)$$

با توجه به این که محیط متمامواد هذلولوی گرافن پایه

غیرمغناطیسی فرض شده،  $\overline{\mu_{GHMM}} = 1$  است. با قراردادن

$$\text{معادله ماکسول به صورت } \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \overline{\mu_{GHMM}} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \text{ و در}$$

نظر گرفتن موج تخت تک‌فام تابشی بر محیط به صورت

$$\mathbf{H} = H_y(z) e^{i(k_x x - \omega t)} \hat{e}_y \text{، برای قطبش TM، در معادله (۷)،}$$

پس از انجام عملیات جبری ساده، می‌توان معادله موج برای

قطبش TM، درون لایه متناوب گرافن و دی‌الکتریک را به

صورت رابطه (۸) به دست آورد

$$\frac{d^2 H_y}{dz^2} + \gamma_1 \frac{\epsilon_{xz}}{\epsilon_{zz}} k_x \frac{dH_y}{dz} + \left( \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\epsilon'_{\parallel} \epsilon'_{\perp}}{\epsilon_{zz}} - \frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{zz}} k_x^2 \right) H_y = 0, \quad (8)$$

$$k_x = n \left( \frac{\omega}{c} \right) \sin \theta, \quad (9)$$

که در آن  $n$  ضریب شکست محیط متمامواد هذلولوی گرافن پایه

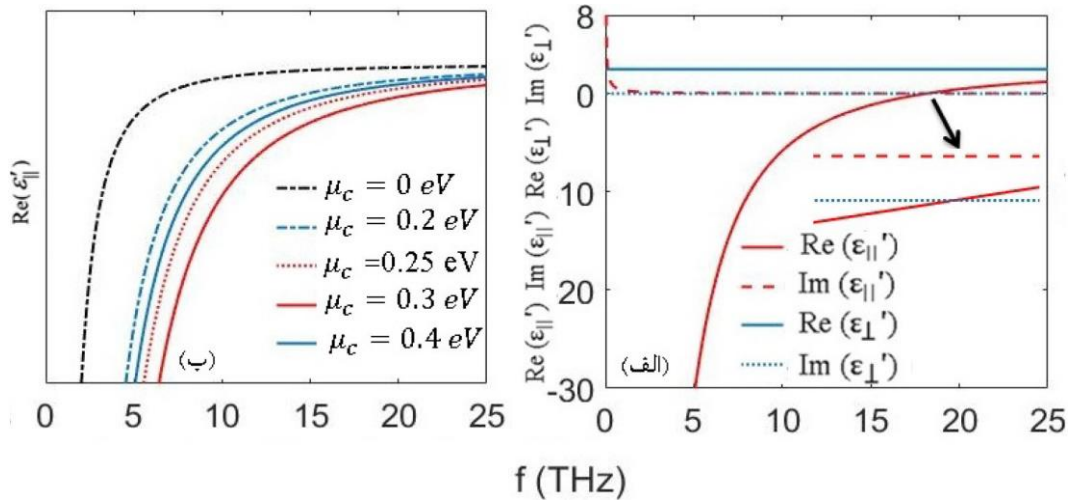
می‌باشد و اگر هوا باشد می‌توان آن را برابر با یک قرار داد.

برای حل معادله (۸)، می‌توان جوابی فرضی به صورت

$$H_y(z) = H e^{i\beta z}$$

است که مقداری ثابت دارد) و با قرار دادن در معادله موج،

برای  $\beta$  که همان بردار موج در محیط متمامواد هذلولوی با



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قسمت‌های حقیقی و موهومی مؤلفه‌های موازی و عمودی گذردهی الکتریکی محیط شامل تمامود گرافن پایه.

### ۳. بحث و نتایج

در ابتدا، برای این که نشان داده شود محیط شامل نانولایه‌های گرافن و دی‌الکتریک در چه نواحی بسامدی به صورت تمامود هذلولوی رفتار می‌کند، یعنی دارای مؤلفه موازی و عمودی گذردهی الکتریکی نسبی ( $\epsilon'_{||}$  و  $\epsilon'_{\perp}$ ) مختلف علامت می‌باشد، این مؤلفه‌ها بر حسب بسامد رسم شده‌اند. در این بررسی داده‌های در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی عبارتند از: پتانسیل شیمیایی  $\mu_C = 0.25$  eV، دمای مطلق  $T = 300$  K، کلونین، همچنین، گذردهی الکتریکی نسبی لایه‌های دی‌الکتریک  $\epsilon_S = 2.5$ ، ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک  $d_S = 0.1$  میکرومتر و ضخامت لایه‌های گرافن  $d_G = 0.34$  نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. چون نانولایه‌های گرافن در مقایسه با لایه دی‌الکتریک خیلی نازک هستند ( $d_G \ll d_S$ )، می‌توان مؤلفه‌های عمودی و مماسی تانسور گذردهی الکتریکی نسبی تمامود گرافن پایه را به صورت  $\epsilon'_{||} = \epsilon_S + \frac{i\sigma_G}{\epsilon_0 \omega d_S}$  و  $\epsilon'_{\perp} = \epsilon_S$  در نظر گرفت، پس فقط مؤلفه مماسی به بسامد وابسته خواهد بود. این مؤلفه‌ها بر حسب بسامد در فاصله بسامدی  $0$  تا  $25$  تراهرتز در شکل ۲ (الف) رسم شده‌اند. با توجه به این شکل، در بسامدهای خاصی، بخش حقیقی  $\epsilon'_{||}$  منفی و  $\epsilon'_{\perp}$  مثبت هستند، بنابراین، در این فاصله بسامدی محیط تمامود پاشندگی هذلولوی خواهند داشت و می‌توان آن را به صورت یک محیط تمامود هذلولوی

تمامود هذلولوی گرافن پایه غیرمغناطیسی باشد. با استفاده از این روابط و به کار بردن معادلات ماکسول و اعمال شرایط مرزی و شرایط پیوستگی روی مؤلفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، تراگسیل ( $T_p$ )، بازتاب ( $R_p$ ) و فاز باریکه بازتابنده  $\varphi_{rp}$  موج بازتابی از محیط محاسبه می‌شوند، که روابط مربوط به آن به صورت رابطه (۱۶) خلاصه می‌شوند:

$$T_p = \frac{\text{Real}(\hat{S}_t \cdot \hat{e}_z)}{\text{Real}(\hat{S}_i \cdot \hat{e}_z)} \rightarrow T_p = \text{Real} \left( \frac{q_D}{A} \right) |t_p|^2, \dots, \quad (16)$$

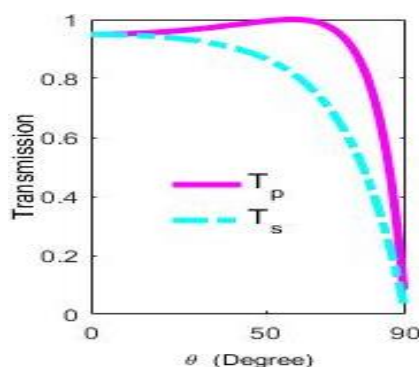
$$t_p = \frac{2A}{q_D + A}, \quad A = \frac{k_{1z}}{\epsilon_1 \epsilon_0 \omega},$$

$$q_D = \epsilon_{zz} \alpha_r / (\epsilon_1 \omega \epsilon'_{\perp} \epsilon'_{||}),$$

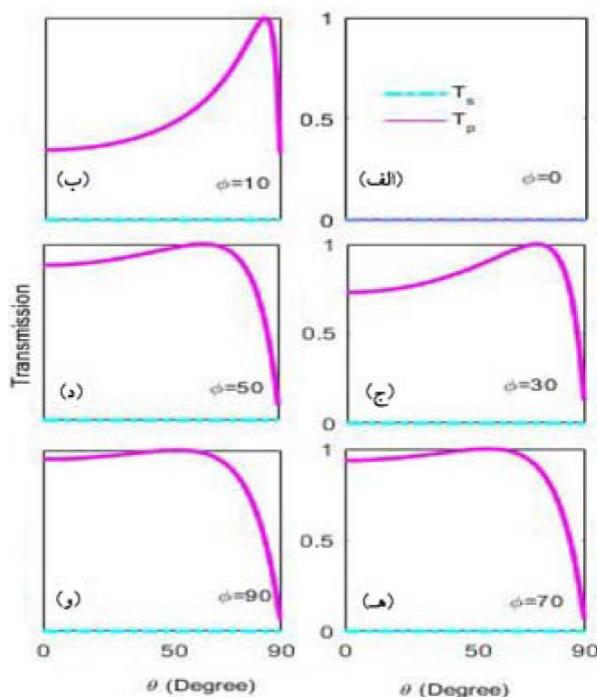
$$r_p = \frac{q_D - A}{q_D + A}, \quad R_p = |r_p|^2,$$

$$\varphi_{rp} \pm \pi = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(r_p)}{\text{Re}(r_p)}, \quad r_p = |r_p| e^{i\varphi_p},$$

که در آن،  $\hat{S}_i = \mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i^*$  و  $\hat{S}_t = \mathbf{E}_t \times \mathbf{H}_t^*$ ، به ترتیب، شار انرژی (بردار پویستینگ) در محیط اول (تابشی) و محیط دوم (تمامود هذلولوی) را نشان می‌دهند (در روابط علامت \* به معنای مزدوج مختلط کمیت مورد نظر است و زیرنویس p برای قطبش TM به کار برده شده است) و  $\omega$  بسامد موج تابشی،  $\epsilon_1$  گذردهی الکتریکی محیط اول می‌باشند. برای قطبش TE هم، می‌توان روابط مشابهی را به دست آورد.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) انتقال از مرز دو محیط. محیط اول هوا، محیط دوم دی الکتریک با گذردهی الکتریکی  $\epsilon_r = 2/5$   $f = 0/9$  ترهرتز).

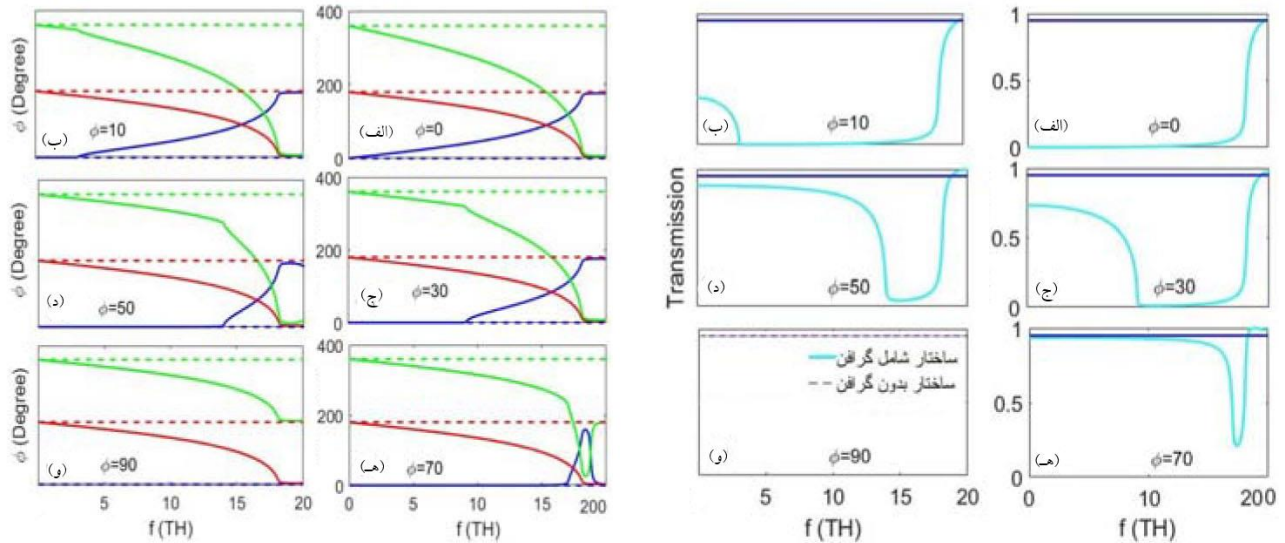


شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) انتقال برحسب زاویه تابش برای دو قطبش TE (خطوط خطچین) و TM (خطوط پر) برای زاویه‌های مختلف  $\phi$ ،  $\epsilon_r = 1$  و محیط دوم متامواد هذلولوی گرافن پایه با محور نوری مورب)  $f = 0/9$  ترهرتز و  $\mu_c = 0/25$  الکترون ولت.

رسم شده است (در تمامی شکل‌ها p بیانگر قطبش TM است، یعنی میدان مغناطیسی موازی با صفحه تابش است). در این بسامد، مؤلفه موازی گذردهی الکتریکی محیط دوم شامل متامواد گرافن پایه منفی می‌باشد و چون دو مؤلفه عمودی و موازی گذردهی الکتریکی علامت مخالف دارند، پاشندگی هذلولوی داریم. همچنین، برای مقایسه نمودار به دست آمده برای محیط متامواد با محیط عادی، نمودارهای مربوط به حالتی که محیط دوم دی الکتریک (بدون گرافن) باشد، در شکل ۴ رسم شده است. با توجه به شکل ۴ الف، زمانی که محیط

گرافن پایه در نظر گرفت. مطابق با این شکل این دو مؤلفه در بازه بسامدی صفر تا تقریباً  $18/12$  ترهرتز مختلف علامت هستند، چون  $\epsilon_{||}$  منفی است، پس در این ناحیه محیط به صورت متامواد هذلولوی گرافن پایه عمل می‌کند. البته، این ناحیه بسامدی می‌تواند با افزایش پتانسیل شیمیایی نانولایه‌های گرافن، افزایش یابد و بازه بسامدی بالاتری را شامل شود (شکل ۲ ب).

برای ساختار نشان داده شده در شکل ۱، در بسامد خاص  $f = 0/9$  ترهرتز زمانی که محیط اول هوا ( $\epsilon_r = 1$ ) باشد، انتقال برحسب زاویه تابش برای  $\phi$  های مختلف در شکل ۳



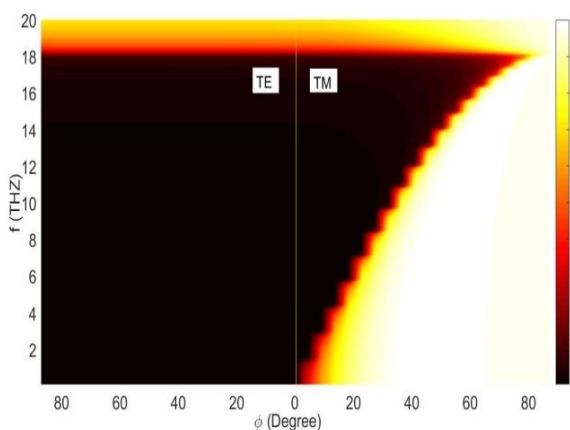
شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) انتقال بر حسب بسامد برای قطبش TM، (شکل سمت راست)، فاز باریکه بازتابنده از ساختار برای دو قطبش TM (رنگ آبی) و TE (رنگ قرمز) و اختلاف این دو قطبش (سبز) (شکل سمت چپ، خطوط نقطه چین مربوط به ساختار بدون گرافن است) از مرز هوا با محیط متامواد گرافن پایه برای  $\mu_C = 0.25$  الکترون ولت.

ناهمسانگردی القاشده هندسی نباشد ( $\phi = 0^\circ$ )، یک ناحیه بسامدی بزرگ تقریباً بدون انتقال در ناحیه‌ای که محیط دوم به صورت متامواد هذلولوی است (یعنی در ناحیه‌ای که درایه‌های تانسور گذردهی الکتریکی مختلف علامت هستند)، دیده می‌شود که ناشی از حضور لایه‌های گرافن در ساختار است و این ناحیه با افزایش زاویه  $\phi$  کاهش پیدا می‌کند و در زاویه  $\phi = 5^\circ$  (شکل ۵. د) تقریباً از بین می‌رود و در زاویه  $\phi = 9^\circ$  انتقال از ساختار دقیقاً مثل محیط معمولی عمل می‌کند و مستقل از بسامد است. با توجه به شکل ۵ سمت چپ طیف مربوط به فاز باریکه منعکسه از ساختار نیز در محیط متامواد گرافن پایه تغییر می‌کند و از این شکل نیز مشخص است که تغییرات تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که محیط پاشندگی هذلولوی داشته باشد (بسامد ۱۸/۱۲ تراهرتز).

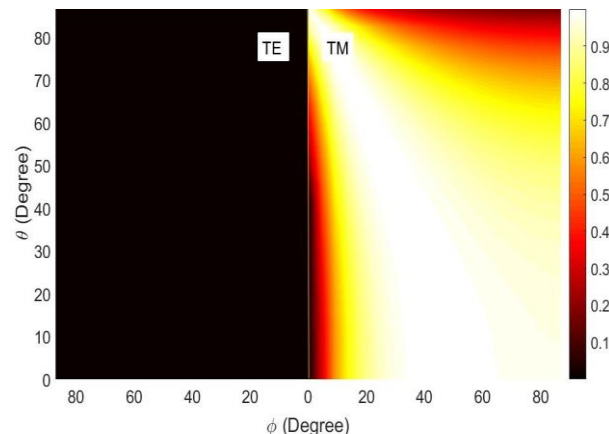
برای وضوح بیشتر اثر ناهمسانگردی القا شده هندسی بر طیف‌های اپتیکی متامواد گرافن پایه، طیف انتقال در صفحه شامل زاویه تابش موج بر فصل مشترک دو محیط و زاویه ناهمسانگردی  $\phi$  برای دو قطبش TE و TM در شکل ۶ رسم شده است. با توجه به این شکل کاملاً مشخص است که طیف انتقال برای قطبش TM با تغییر زاویه  $\phi$  تغییر می‌کند. ولی،

همسانگرد است، یعنی زاویه  $\phi$  برابر صفر باشد، هیچ گونه انتقال نوری از محیط نداریم، که علت نبود انتقال، حضور نانولایه‌های گرافن در ساختار است. اما، با افزایش زاویه  $\phi$ ، انتقال برای قطبش TM، به طور قابل ملاحظه افزایش پیدا می‌کند. حتی، در زوایای تابش خاصی به مقدار یک نیز می‌رسد و در زاویه ناهمسانگردی  $\phi = 5^\circ$  محیط تقریباً نسبت به گرافن شفاف می‌شود و منحنی انتقال، شبیه حالت محیط بدون گرافن در شکل ۳ می‌شود. با توجه به معادلات (۱۳)، (۱۴)، و (۱۵)، خواص اپتیکی ساختار برای قطبش TE مستقل از زاویه ناهمسانگردی  $\phi$  می‌باشد و فقط وابسته به  $\epsilon_{||}$  است که مستقل از  $\phi$  می‌باشد.

برای بررسی بیشتر محیط متامواد هذلولوی شامل ناهمسانگردی القا شده هندسی، طیف انتقال و فاز باریکه منعکسه از ساختار بر حسب بسامد در حالت تابش عمودی، در فاصله بسامدی صفر تا ۲۰ تراهرتز در شکل ۵ رسم شده‌اند. همچنین، برای بررسی بهتر ساختار شامل گرافن، طیف انتقال مربوط به حالتی که در ساختار گرافن وجود نداشته باشد، با رنگ آبی رسم شده است (شکل سمت راست). با توجه به این شکل، انتقال از ساختار وابسته به بسامد است و زمانی که



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف تراگسیل ساختار شکل ۱ در صفحه  $(\phi, f)$  برای قطبش‌های TE و TM، زمانی که  $n=1$  (محیط اول هوا باشد).



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف تراگسیل ساختار شکل ۱ در صفحه  $(\phi, \theta)$  برای قطبش‌های TE و TM، زمانی که  $n=1$  (محیط اول هوا باشد).

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر ناهمسانگردی القا شده هندسی، برخواص انتقال و فاز باریکه منعکسه از مرز هوا با محیط نیمه نامحدود متشکل از متامواد گرافن پایه، توسط به کاربردن معادلات ماکسول برای امواج تابشی و عبوری و اعمال شرایط پیوستگی روی دامنه‌های امواج در مرز محیط متامواد هذلولوی با هوا و با به کاربردن روش تقریب محیط مؤثر برای محیط متامواد هذلولوی گرافن پایه، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان دادند که در ناحیه تراهرتز در نزدیکی بسامد  $18.12$  تراهرتز که محیط پاشندگی هذلولوی از خود نشان می‌دهد تغییرات قابل توجهی در طیف‌ها دیده می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده نشان دادند که ناهمسانگردی القا شده هندسی، طیف انتقال ناشی از قطبش TM را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نواحی بدون انتقال در ساختار همسانگرد، شامل لایه‌های گرافن را تغییر می‌دهد و باعث می‌شود این نواحی در زوایای ناهمسانگردی بالا محو شوند. با توجه به این خواص محیط متامواد هذلولوی، می‌توان از آنها برای ساخت وسایل اپتیکی تنظیم پذیر استفاده کرد.

برای قطبش TE همان طور که قبل‌تر (شکل ۳) بیان شده است هیچ گونه انتقالی وجود ندارد، که به واسطه حضور گرافن است. همچنین در این شکل‌ها نواحی تاریک نشان دهنده گاف یا نواحی بدون انتقال امواج هستند و نواحی روشن عبوردهی امواج را نشان می‌دهند.

برای بررسی بیشتر این تغییرات شدید در طیف انتقال مربوط به قطبش TM طیف انتقال از ساختار شکل ۱ در صفحه شامل بسامد و زاویه ناهمسانگردی، در شکل ۷ رسم شده است. با توجه به این شکل انتقال از ساختار برای قطبش TM با تغییر زاویه ناهمسانگردی و بسامد در ناحیه‌ای که محیط به صورت متامواد هذلولوی است، به شدت تغییر می‌کند. با توجه به این شکل مشخص است که این تغییر شدید مربوط به ناحیه بسامدی است که پاشندگی هذلولوی وجود دارد؛ چون تغییرات تا بسامد تقریباً  $18.12$  تراهرتز ادامه دارد که همان طور که قبلاً ذکر شده است تا این بسامد محیط پاشندگی هذلولوی از خود نشان می‌دهد. پس این تغییرات، به ایجاد ناهمسانگردی هندسی القا شده در محیط متامواد هذلولوی نسبت داده می‌شود. البته این ناحیه بسامدی با تغییر پتانسیل شیمیایی نانولایه‌های گرافن تا بسامدهای بالاتری ادامه پیدا می‌کند (شکل ۲. ب).



## مراجع

11. C Rizza, A Ciattoni, E Spinozzi, and L Columbo, *Optics Letters* **37** (2012) 3345.
12. S Campione, T S Luk, S Liu, and M B Sinclair, *JOSA. B* **32** (2015) 1809.
13. K Sreekanth, A De Luca, and G Strangi, *Applied Physics Letters* **103** (2013) 023107.
14. A Madani, S Zhong, H Tajalli, S Roshan Entezar, A Namdar, and Y Ma, *Progress In Electromagnetics Research* **143** (2013) 545.
15. M A Othman, C Guclu, and F Capolino, *Optics Express* **21** (2013) 7614.
16. J Linder and K Halterman, *Scientific Reports* **6** (2016) 31225.
17. X Gan, K F Mak, Y Gao, Y You, F Hatami, J Hone, T F Heinz, and D Englund, *Nano Letters* **12** (2012) 5626.
18. W Zhu, F Xiao, M Kang, D Sikdar, and M Premaratne, *Applied Physics Letters* **104** (2014) 051902.
19. Z Saleki, S R Entezar, and A Madani, *Applied Optics* **56** (2017) 317.
20. I S Nefedova, L A Melnikovb, and E I Nefedovc, in: *Proc. of SPIE* **8771** (2013) 87710K.
1. A Poddubny, I Iorsh, P Belov, and Y Kivshar, *Nat. Photon* **7** (2013) 948.
2. I V Iorsh, I S Mukhin, I V Shadrivov, P A Belov, Y S Kivshar, *Physical Review B* **87** (2013) 075416.
3. C Cortes, W Newman, S Molesky, and Z Jacob, *Journal of Optics* **14** (2012) 063001.
4. L Ferrari, C Wu, D Lepage, X Zhang, and Z Liu, *Progress in Quantum Electronics* **40** (2015) 1.
5. M Hoseinzadeh, E Amooghorban, and A Mahdifar, *Iran. J. Phys. Res.* **16**, 4 (2017) 305.
۵. م حسین‌زاده، اعمو قربان، وع مهدی‌فر، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۱۶، ۴ (۱۳۹۵) ۳۰۵.
6. R S Kshetrimayum, *IEEE Potentials* **23** (2004) 44.
7. H Luo, W Hu, W Shu, F Li, and Z Ren, *EPL (Europhysics Letters)* **74** (2006) 1081.
8. H Sakli, D Bouchouicha, and T Aguilu, *IJCSI.* **9** (2012) 1694.
9. A Madani, S R Entezar, A Namdar, and H Tajalli, *JOSA. B* **29** (2012) 2910.
10. X Ni, S Ishii, M D Thoreson, V M Shalaev, S Han, S Lee, and A V Kildishev, *Optics Express* **19** (2011) 25242.