



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



تأثیر جهت‌گیری محور نوری بر جابجایی گوس-هانچن در بره‌ای از فرامواد هایپربولیک گرافن-پایه

نگار شعبانی^۱، امیر مدنی^۱، صمد روشن‌انتظار^۲ و رضا عبدی‌قلعه^۱

^۱گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی

^۲دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی

چکیده - در این مقاله به مطالعه تأثیر جهت‌گیری تک لایه‌های گرافن در میزان جابجایی گوس-هانچن در بره‌ای از فراماده هایپربولیک گرافن-پایه پرداخته شده است. بررسی با استفاده از روش ماتریس انتقال و در مرز بره با هوا صورت گرفته است. ساختار مورد بررسی متشکل از یک لایه شیشه به عنوان محیط ورودی، یک لایه هوا و یک ساختار لایه‌ای شامل لایه‌های گرافن و دی‌الکتریک است. چنین ساختاری امکان تحریک امواج سطحی با قطبش TM را در ناحیه فرکانسی تراهرتز فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهند با تحریک امواج سطحی جابجایی گوس-هانچن قابل ملاحظه‌ای در مرز به وجود می‌آید که تابع زاویه جهت‌گیری لایه‌های گرافن است.

کلیدواژه - امواج سطحی، جابجایی گوس-هانچن، گرافن، فرامواد هایپربولیک، محور نوری

Influence of the orientation of the optical axis on Goos-Hanchen shift at the interface of a graphene-based hyperbolic metamaterial

Negar Shaabani¹, Amir Madani¹, Samad Roshan Entezar², Reza Abdi-Ghaleh¹

¹Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab

²Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz

negarshaabani@outlook.com(N.S.); a-madani@bonabu.ac.ir(A.M.)

s-roshan@tabrizu.ac.ir(S.R.E.); reza.abdi82@gmail.com(R.A.G.)

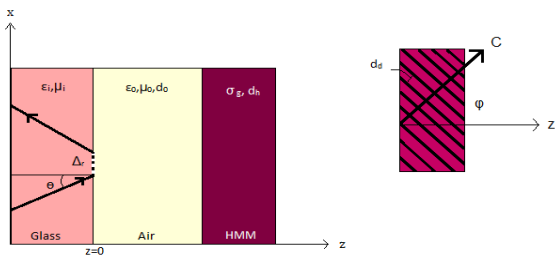
Abstract- In this paper, the influence of the orientation of the graphene monolayers on Goos-Hanchen shift of a graphene-based hyperbolic metamaterial (HMM) slab has been studied. The investigation has been done at the interface of the slab and air, using the transfer matrix method. The structure contains a layer of glass as entrance medium, a layer of air and a HMM multilayer containing graphene-dielectric layers. This arrangement obtains the excitation of TM-polarized surface polaritons (SPs) at the terahertz frequency. The excitation of SPs results in the significant GH shift at the interface which is dependent on the orientation of graphene monolayers.

Keywords: Goos-Hanchen shift, graphene, hyperbolic metamaterials, optical axis, surface polaritons.

مقدمه

هنگامی که پرتو نور از سطح جدایی دو محیط همگن بازتاب کامل می‌کند، دچار یک جابجایی جانبی به نام جابجایی گوس-هانچن می‌شود. دلیل این جابجایی تغییر فاز متفاوت هر کدام از مولفه‌های تشکیل دهنده موج بازتابی است [۱]. در حالت عادی جابجایی گوس-هانچن از مرتبه یک طول موج است و به آسانی قابل مشاهده نیست. بنابراین افزایش مقدار این جابجایی برای کاربردی کردن آن ضروری است [۲]. جابجایی گوس-هانچن در مخابرات نوری، ساخت سوئیچ‌های نوری و المان‌های اپتیکی و فوتونیک کاربردی دارد. یک روش برای افزایش این جابجایی، تحریک امواج سطحی است. امواج سطحی نوعی از امواج الکترومغناطیسی هستند که بر روی سطح جدایی دو محیط حرکت کرده و انرژی را انتقال می‌دهند و این امر منجر به افزایش شدید جابجایی عرضی در باریکه‌های بازتابی و عبوری می‌شود [۳]. وجود چنین امواجی با قطبش TM در فصل مشترک دو محیط با ضرایب دی الکتریک مختلف‌العلامت مثل هوا و فلزات در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس پلاسما و یا در هوا و فرامواد مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۴]. فرامواد هایپربولیک از ساختارهای لایه‌ای شامل ترکیب دی‌الکتریک-فلز و اخیراً دی‌الکتریک-گرافن طراحی و ساخته می‌شوند. در این مواد عناصر قطر اصلی تانسور دی الکتریک مختلف‌العلامت هستند و این امر منجر به منحنی پاشندگی هایپربولیک می‌شود که کاربردهای جالب توجهی دارد [۵]. فراماده هایپربولیک در نظر گرفته شده در این مقاله شامل لایه های دی‌الکتریک و گرافن است. گرافن که یک شبکه لانه زنبوری دوبعدی از اتم‌های کربن است ویژگی‌های خارق‌العاده‌ای دارد و می‌توان ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی آن را به وسیله رسانندگی سطحی که وابسته به پتانسیل شیمیایی و زاویه جهت‌گیری لایه‌های گرافن است، توصیف کرد که این ویژگی قابلیت تنظیم‌پذیری را فراهم می‌سازد [۶].

مدل و محاسبات تئوری



شکل ۱: ساختار شامل فراماده هایپربولیک گرافن-پایه برای مطالعه جابجایی گوس-هانچن

ساختار مورد بررسی، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است ساختاری یک‌بعدی شامل یک محیط ورودی از جنس شیشه با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_i = 4$ ، یک لایه هوا با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_0 = 1$ و ضخامت $d_0 = 58 \mu\text{m}$ و یک لایه فراماده هایپربولیک گرافن-پایه با ضخامت $d_h = 30 \mu\text{m}$ است. فراماده هایپربولیک از لایه‌های دی‌الکتریک و گرافن به ترتیب با ضخامت‌های $d_d = 50 \text{nm}$ و $d_g = 0.335 \text{nm}$ و ضرایب دی‌الکتریک $\epsilon_d = 2.25$ و $\epsilon_g = 1 + i \left(\frac{\sigma_g \eta_0}{k_0 d_g} \right)$ تشکیل شده است که در آن $\eta_0 = 377 \Omega$ امپدانس هوا، d_g ضخامت موثر گرافن، k_0 بردار موج خلا با سرعت نور C است. σ_g نیز رسانندگی سطحی لایه‌های گرافن است که بنابر فرمول کوبو [۷، ۸] شامل دو بخش درون‌بندی و بین‌بندی است. ضریب تراوایی تمامی لایه‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه فرکانس کاری در محدوده تراهرتز است برای ساختار در نظر گرفته شده $\lambda \gg (d_d + d_g)$ است. بنابراین می‌توان از تئوری محیط موثر برای بررسی انتشار نور در فراماده هایپربولیک مورد نظر استفاده کرد. لذا ضریب گذردهی الکتریکی موثر محیط به شکل

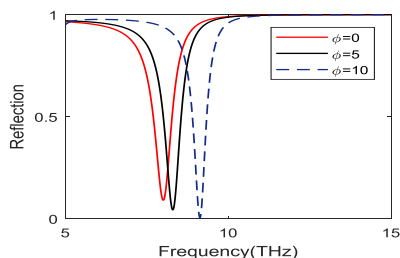
$$\overline{\epsilon}^{\text{eff}} = [\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z]$$

$$\epsilon_{x,y} = \epsilon_{||} = \frac{\epsilon_g d_g + \epsilon_d d_d}{d_g + d_d},$$

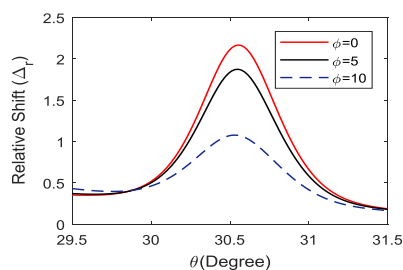
$$\epsilon_z = \epsilon_{\perp} = \frac{\epsilon_g \epsilon_d (d_g + d_d)}{\epsilon_g d_d + \epsilon_d d_g}$$

نتایج و بحث

برای تحقیق تحریک امواج سطحی از روش ATR استفاده شده است. در شکل ۲ نمودار بازتاب بر حسب فرکانس پرتو نور فرودی برای سه زاویه جهت‌گیری متفاوت تک لایه-های گرافن رسم شده است. مشاهده می‌شود که به ازای زاویه‌های جهت‌گیری $\varphi=0^\circ$ ، $\varphi=5^\circ$ و $\varphi=10^\circ$ ، کمترین میزان بازتاب از سطح که نشان‌دهنده فرکانس تحریک امواج سطحی است به ترتیب در فرکانس‌های $f=7.87THz$ ، $f=8.16THz$ و $f=10THz$ رخ می‌دهد.



شکل ۲: بازتاب از سطح بر حسب فرکانس پرتو نور فرودی و به ازای سه زاویه متفاوت φ . پتانسیل شیمیایی برابر $\mu_c = 0.16eV$ است.



شکل ۳: جابجایی عرضی باریکه بازتابی از فصل مشترک فراماده هایپربولیک و هوا بر حسب زاویه فرودی در $\varphi=0^\circ$ ، $\varphi=5^\circ$ و $\varphi=10^\circ$ که به ترتیب در فرکانس‌های $f=7.87THz$ ، $f=8.16THz$ و $f=10THz$ رسم شده است.

با تحریک امواج سطحی میزان جابجایی عرضی باریکه بازتابی از سطح به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۸]. در شکل ۳ میزان جابجایی عرضی باریکه فرودی بر مرز فراماده هایپربولیک و هوا بر حسب زاویه فرودی در سه زاویه φ رسم شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود قله جابجایی عرضی با کاهش مقدار φ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. برای مشاهده بهتر اثر

علامت‌های \perp و \parallel به ترتیب نشان‌دهنده جهت‌های موازی و عمودی نسبت به صفحات گرافن هستند. همانطور که در تصویر الحاقی شکل ۱ نشان داده شده است، اگر تک لایه‌های گرافن نسبت به محور Z انحراف یابند محور اپتیکی که موازی با صفحه $X-Z$ است نسبت به محور Z زاویه φ می‌سازد. بنابراین تانسور گذردهی الکتریکی HMM با رابطه زیر داده می‌شود.

$$\varepsilon^{eff} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & \varepsilon_{xz} \\ 0 & \varepsilon_{\parallel} & 0 \\ \varepsilon_{zx} & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{\parallel} \cos^2 \varphi + \varepsilon_{\perp} \sin^2 \varphi$$

$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\parallel} \sin^2 \varphi + \varepsilon_{\perp} \cos^2 \varphi$$

$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = (\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\parallel}) \sin \varphi \cos \varphi$$

که در آن:

باریکه فرودی از شیشه ($\varepsilon_i \mu_i > \varepsilon_0 \mu_0$) تحت زاویه‌ای بزرگتر از زاویه بحرانی ساختار به بره تابیده می‌شود. پروفایل میدان الکتریکی بازتابی از سطح یک ساختار چندلایه با رابطه زیر به میدان فرودی مربوط می‌شود.

$$E_r(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(k_x) \bar{E}_i(k_x) e^{ik_x x} dk_x \quad (2)$$

که در آن $R(k_x)$ و $\bar{E}_i(k_x)$ به ترتیب ضریب بازتاب مولفه‌های باریکه فرودی و تبدیل فوریه باریکه فرودی هستند. جابجایی عرضی نسبی باریکه بازتابی نیز با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴].

$$\Delta_r = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x' |E_r(x)|^2 dx}{a \int_{-\infty}^{+\infty} |E_r(x)|^2 dx} \quad (3)$$

که در آن $a = 12\lambda$ پهنای باریکه فرودی و λ طول موج خلا نور فرودی است. باریکه فرودی از نوع گاوسی با میدان الکتریکی به شکل $E_r(x) = \exp[-(x^2/4a^2) + ik_x x]$ انتخاب شده است که در آن $k_{\parallel} = k_i \sin \theta$ مولفه مماس با سطح بردار موج فرودی و $k_i = \omega \sqrt{\varepsilon_i \mu_i} / c$ عدد موج مربوطه است.

نتیجه‌گیری

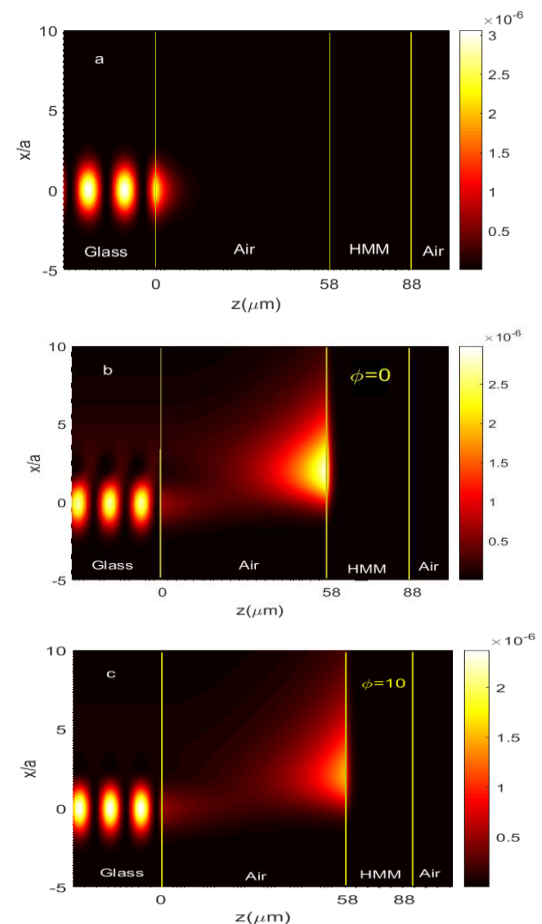
در این مقاله تاثیر جهت‌گیری تک‌لایه‌های گرافن بر میزان جابجایی گوس-هانچن در مرز بره‌ای از فراماده هایپربولیک گرافن-پایه برای پرتو گاوسی با قطبش TM بررسی شده است. ابتدا با روش ATR فرکانس کمترین میزان بازتاب کلی از سطح که متناظر با بیشترین میزان جابجایی عرضی است، به دست آمده است. سپس با ثابت در نظر گرفتن فرکانس، میزان جابجایی عرضی در زوایای مختلف محور نوری بررسی شده است. نتایج و شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهند که با کاهش مقدار ϕ جابجایی عرضی بهتری به دست می‌آید.

مرجع‌ها

- [1] M. Cheng, P. Fu, X. Chen, X. Zeng, S. Feng, R. Chen, "Giant and tunable Goos-Hanchen shifts for attenuated total reflection structure containing graphene"; J. Opt. Soc. Am. B 31 (2014) 2325-2329.
- [2] L. Luo and T. Tang; "Goos-Hanchen effect in Kretschmann configuration with hyperbolic metamaterials"; Superlattices and Microstructures; 94 (2016)85-92.
- [3] A. Madani and S. Roshan Entezar; "Surface polaritons of one-dimensional photonic crystals containing graphene monolayers"; Superlattices and Microstructures, 75 (2014) 692-700
- [4] I. Shadrivov, R. Ziolkowski, A. Zharov and Y. Kivshar; "Excitation of guided waves in layered structures with negative refraction", Opt. Express 13 (2005) 481-492.
- [5] A. poddubny, I. Iorsh, P. Belov and Y. Kivshar; "Hyperbolic metamaterials", Nature Photonics; 243 (2013) 948-957.
- [6] K. Novoselov, A. Geim, S. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. Dubonos, I. Grigorieva, A. Firsov; "Electric field effect in automatically thin carbon films", Science 306 (2004) 666-669.
- [7] G.W. Hanson, "Quasi-transverse electromagnetic modes supported by a graphene parallel-plate waveguide"; J. Appl. Phys. 104 (2008) 084314-5.

[۸] امیر مدنی، نگار شعبانی، صمد روشن‌انظار و رضا عبدی، "مطالعه پدیده جابجایی گوس-هانچن در بره‌ای از متامواد هایپربولیک گرافن-پایه"، مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران، (۱۳۹۷) ۷۳۶-۷۳۹

جهت‌گیری لایه‌های گرافن بر میزان جابجایی عرضی یک شبیه‌سازی عددی انجام شده است که توزیع میدان الکتریکی با قطبش TM را در ساختار نشان می‌دهد. در شکل ۴(a) توزیع میدان الکتریکی در زاویه‌ای دور از تحریک امواج سطحی رسم شده است. در این زاویه پرتو نور صرفاً بازتاب کلی کرده و جابجایی عرضی قابل ملاحظه‌ای رخ نمی‌دهد. در دو شکل بعدی میدان الکتریکی برای دو زاویه $\phi=0^\circ$ و $\phi=10^\circ$ در توزیع امواج سطحی شبیه‌سازی شده است. با دقت در میدان الکتریکی مربوط به هر دو زاویه و با در نظر گرفتن میله رنگ که نشانگر شدت میدان است، ملاحظه می‌شود که ماکسیمم مقدار شدت میدان الکتریکی در زاویه $\phi=0^\circ$ بزرگتر از ماکسیمم مقدار شدت میدان در $\phi=10^\circ$ است. و این موضوع، کاهش جابجایی عرضی در زاویه‌های بزرگتر از صفر ϕ را تایید می‌کند.



شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی در خارج و داخل بره برای (a) زاویه تابش $\theta=40^\circ$ (b) زاویه جهت‌گیری $\phi=0^\circ$ و (c) $\phi=10^\circ$.