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

مطالعه پدیده جابجایی گوس-هانچن در ساختار نیمه بی‌نهایت یک بعدی حاوی فراماده هایپربولیک گرافن-پایه

نگار شعبانی[۱]، امیر مدنی[۱] و صمد روشن انتظار[۲]

[۱] گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی

[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی

چکیده – در این مقاله پدیده جابجایی گوس-هانچن در یک محیط یک بعدی نیمه بی‌نهایت حاوی فراماده هایپربولیک گرافن-پایه به صورت تئوری و با روش ماتریس انتقال مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند در صورت تحریک امواج سطحی با قطبش TM در محدوده فرکانسی THz میزان جابجایی عرضی بزرگ و قابل مقایسه با پهنای باریکه فرودی به دست می‌آید. برای تحقیق تحریک امواج سطحی در ساختار از روش بازتاب کلی کاهش یافته (رسم نمودار ATR) استفاده شده است. و در نهایت شبیه‌سازی‌های عددی انجام یافته نتایج به دست آمده را تایید کرده است.

کلید واژه- امواج سطحی، جابجایی گوس-هانچن، گرافن، ماتریس انتقال، فراماده هایپربولیک

Study of Goos-Hanchen shift in semi-infinite one-dimensional structure containing graphene-based hyperbolic metamaterial

Negar Shaabani[1], Amir Madani[1] and Samad Roshan Entezar[2]

[1]Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab
[2]Faculty 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.)

Abstract- In this paper the Goos-Hanchen effect in semi-infinite one-dimensional medium containing graphene-based hyperbolic metamaterial has been investigated theoretically using transfer matrix method. The results show that the lateral shift would be increased noticeably by the excitation of the TM-polarized surface polaritons in the THz frequency region. The excitation of surface polaritons has been verified by plotting ATR curves for the structure. Finally, the results have been verified by numerical simulations.

Keywords: Goos-Hanchen shift, graphene, hyperbolic metamaterials, surface polaritons, transfer matrix

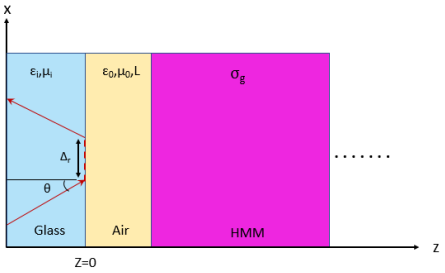
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]

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

مقدمه

زمانی که یک پرتو نور تحت بازتاب کلی به فصل مشترک بین دو محیط همگن می‌تابد، یک جابجایی عرضی در مرکز پرتو نور بازتابی نسبت به مرکز نور تابشی رخ می‌دهد این پدیده به جابجایی گوس-هانچن معروف است [۱]. میزان این جابجایی در حالت عادی کمتر از یک طول موج است. اما در ساختارهایی که با ایجاد امواج سطحی، انرژی در فصل مشترک انتقال داده می‌شود، می‌توان اندازه این جابجایی را افزایش داد [۲]. مدهای سطحی نوع خاصی از موج‌های جایگزیده در فصل مشترک جدایی دو محیط هستند که در مرز دارای بیشترین مقدار دامنه هستند و با دور شدن از مرز از هر دو طرف دامنه‌ها کاهش می‌یابد [۳]. وجود چنین امواجی با قطبش TM در فصل مشترک دو محیط با ضرایب دی‌الکتریک مختلف‌العلامت مثل هوا و فلزات در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس پلاسما و یا در هوا و فراماده مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۴]. فراماده هایپربولیک ساختارهای مصنوعی لایه‌ای هستند که در یک جهت مانند فلز و در جهتی دیگر مانند دی‌الکتریک رفتار می‌کنند. در این محیط‌ها تانسور گذردهی الکتریکی داری مولفه‌های با علامت مخالف است که نتیجه آن سطح هم‌فرکانس هذلولوی به جای سطح هم‌فرکانس بیضوی است. این ویژگی باعث به وجود آمدن کاربردهای جالب توجهی شده است [۵]. در نواحی طول موجی بلند که ثابت شبکه ساختار در مقایسه با آن کوچک است می‌توان از تقریب محیط موثر برای مطالعه این محیط‌ها استفاده کرد. در این حالت کل ساختار به عنوان یک ساختار همگن ناهمسانگرد دیده می‌شود که دارای تانسور گذردهی الکتریکی قطری است. فراماده هایپربولیک بکار گرفته شده در این مقاله شامل نانولایه‌های گرافن است که با توجه به خاصیت تنظیم‌پذیری آن، دسترسی به جابجایی گوس-هانچن قابل کنترل را امکان‌پذیر می‌سازد.

مدل و محاسبات تئوری



شکل ۱: ساختار نیمه بی نهایت یک بعدی حاوی فراماده هایپربولیک جهت تحریک امواج سطحی

در شکل ۱ ساختار مورد بررسی که یک محیط یک بعدی نیمه بی‌نهایت به ترتیب متشکل از شیشه به عنوان محیط ورودی با ضریب گذردهی الکتریکی $\varepsilon_i = 4$، یک لایه هوا با ضریب گذردهی الکتریکی $\varepsilon_i = 1$ و ضخامت $L = 5\mu m$ و محیطی نیمه‌بینهایت از فراماده هایپربولیک گرافن-پایه است. فراماده هایپربولیک از لایه‌های دی‌الکتریک و گرافن به ترتیب با ضخامت‌های $d_d = 50nm$ و $d_g = 0.335nm$ و ضرایب دی‌الکتریک $\varepsilon_d = 2.25$ و $\varepsilon_g = 1 + i\left(\frac{\sigma_g \eta_0}{k_0 d_g}\right)$ 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 [۶] شامل دو بخش درون‌باندی و بین‌باندی به صورت زیر است.

$$\sigma_g(\omega) = \sigma_g^{intra}(\omega) + \sigma_g^{inter}(\omega) \qquad (۱)$$

$$\sigma_g^{intra}(\omega,\mu_c) = i\frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar(\hbar\omega + i2\Gamma_1)}\left(\frac{\mu_c}{k_B T} + 2\ln\left(e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} + 1\right)\right)$$

$$\sigma_g^{inter}(\omega,\mu_c) = i\frac{e^2}{4\pi\hbar}\ln\left(\frac{2|\mu_c| - (\hbar\omega + i2\Gamma_2)}{2|\mu_c| + (\hbar\omega + i2\Gamma_2)}\right)$$

که در آن e بار الکترون k_B ثابت بولتزمن، μ_c پتانسیل شیمیایی لایه‌های گرافن، $\hbar$ ضریب ثابت پلانک، T دمای درنظر گرفته شده، ω فرکانس زاویه‌ای و Γ_1 و Γ_2 به ترتیب نرخ پراکندگی انتقالات درون‌باندی و بین‌باندی هستند که

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]

$\Gamma_1 = \Gamma_2 = 1meV$ است. ضریب تراوایی تمامی لایه‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شده است. در این ساختار تک‌لایه‌های گرافن در صفحه x-y قرار گرفته و ساختار در راستای محور z تکرار می شود. تانسور گذردهی الکتریکی HMM با رابطه زیر داده می‌شود.

$$\varepsilon^{eff} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & \varepsilon_{xz} \\ 0 & \varepsilon_{\parallel} & 0 \\ \varepsilon_{zx} & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

که

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{\perp}\cos^2\varphi + \varepsilon_{\parallel}\sin^2\varphi$$
$$\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\perp}\sin^2\varphi + \varepsilon_{\parallel}\cos^2\varphi$$
$$\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp})\sin\varphi\cos\varphi$$

همچنین $\varepsilon_{\parallel} = \frac{\varepsilon_g d_g + \varepsilon_d d_d}{d_g + d_d}$ و $\varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_d (d_g + d_d)}{\varepsilon_g d_d + \varepsilon_d d_g}$ است. φ نشان‌دهنده جهت‌گیری تک‌لایه‌های گرافن است. باریکه فرودی یک باریکه گاوسی با فرکانس $f = 29.22THz$ و میدان الکتریکی $E_i(x) = \exp[-(x^2/4a^2) + ik_{xi}x]$ که در آن $a = 5\lambda$ پهنای باریکه فرودی، λ طول موج خلا نور فرودی، $k_{xi} = k_i \sin\theta$ مولفه مماس با سطح بردار موج فرودی و $k_i = \omega\sqrt{\varepsilon_i \mu_i}/c$ عدد موج مربوطه است. نور از شیشه $(\varepsilon_i\mu_i > \varepsilon_0\mu_0)$ تحت زاویه بزرگتر از زاویه بحرانی محیط به ساختار می‌تابد. میدان الکتریکی بازتابی از سطح یک ساختار چندلایه با رابطه زیر به میدان فرودی مربوط می‌شود.

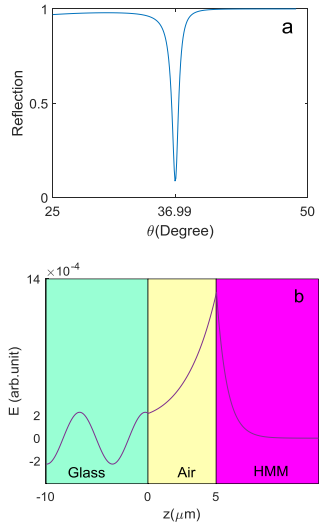
$$E_r(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} R(k_x)\overline{E}_i(k_x)e^{ik_x x}dk_x \qquad (۳)$$

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

$$\Delta_r = \frac{1}{a}\frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^r |E_r(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_r(x)|^2 dx} \qquad (۴)$$

اندیس و بالانویس r در هر دو رابطه (۳) و (۴) اشاره به باریکه بازتابی از سطح دارد. $\Delta_r << 1$ نشان‌دهنده جابجایی عرضی بسیار کوچکتر از پهنای باریکه فرودی و $\Delta_r \geq 1$ نشان‌دهنده جابجایی عرضی بزرگ و قابل مقایسه با پهنای باریکه است.

نتایج و بحث

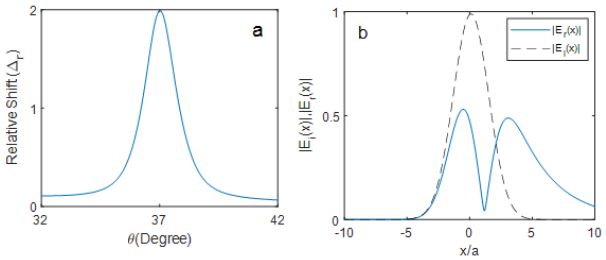


شکل ۲: (a) بازتابندگی ساختار بر حسب زاویه فرودی (b) تحریک امواج سطحی در مرز هوا و فراماده

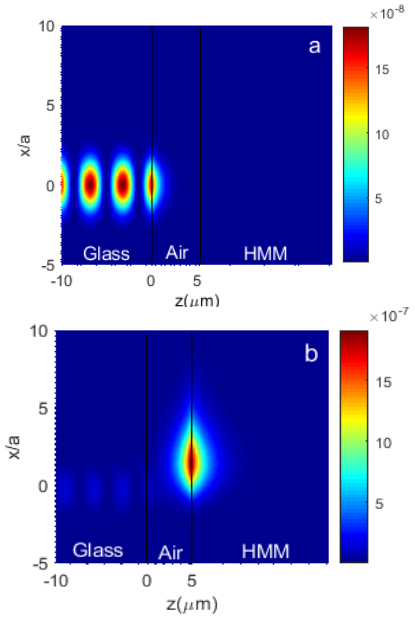
باریکه فرودی با قطبش TM از شیشه به عنوان محیط چگال، با زاویه بزرگتر از زاویه بحرانی وارد لایه هوا شده است و در مرز هوا و شیشه بازتاب کلی رخ داده است. با تغییر زاویه تابش باریکه و محاسبه بازتابندگی مشاهده می‌شود که در زاویه $\theta = 36.99°$ افت شدید در طیف بازتابندگی صورت گرفته که نشان‌دهنده تحریک امواج سطحی در این زاویه است. این موضوع در شکل ۲a به نمایش در آمده است. در شکل ۲b نیز پروفایل دوبعدی میدان الکتریکی درون و بیرون ساختار نشان داده شده است که به وضوح نشانگر تحریک امواج سطحی در مرز هوا و فراماده است. با توجه به تحریک امواج سطحی در زاویه مذکور انتظار می‌رود بیشترین میزان جابجایی عرضی نیز در این زاویه رخ دهد. که این موضوع در شکل ۳a نمایش داده شده است. برای مشاهده بهتر این پدیده با توجه به باریکه فرودی و بازتابی، در شکل ۳b دامنه میدان الکتریکی فرودی و بازتابی بر حسب مختصات x

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]

رسم شده‌اند. در زاویه متناسب با تحریک امواج سطحی، بخشی از انرژی باریکه به امواج سطحی منتقل شده و بخش دیگری از باریکه یک بازتاب معمولی خواهد داشت. لذا آن قسمت از باریکه که تحت تاثیر امواج سطحی قرار گرفته است، یک جابجایی عرضی نسبتا بزرگ را تجربه کرده و سپس از مرز بازتاب خواهد کرد و بخش دیگر بدون جابجایی عرضی قابل ملاحظه‌ای بازتاب می‌شود. لذا در پروفایل میدان بازتابی یک منحنی دو قله‌ای مشاهده می شود.



شکل ۳: (a)جابجایی عرضی باریکه بازتابی برحسب زاویه فرودی (b)پروفایل میدان باریکه بازتابی (منحنی پررنگ) و باریکه فرودی (منحنی خط چین) بر حسب x . زاویه فرودی $\theta = 36.99°$ است.



شکل ۴: توزیع میدان مغناطیسی در داخل و خارج ساختار در زاویه فرودی $\theta = 46°$ (a) $\theta = 36.99°$ (b).

برای نمایش بهتر اثر تحریک امواج سطحی بر جابجایی عرضی با استفاده از یک شبیه‌سازی عددی توزیع میدان الکتریکی در داخل و خارج ساختار در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۴a که توزیع میدان الکتریکی در زاویه ای به اندازه کافی دور از شرایط تحریک امواج سطحی را نشان می‌دهد، جابجایی قابل مشاهده‌ای در مرز رخ نداده است. اما در شکل ۴b توزیع میدان الکتریکی را برای زاویه $\theta = 36.99°$ که متناسب با تحریک امواج سطحی است نمایش می‌دهد. در صورت تحریک امواج سطحی در مرز فراماده و هوا، انرژی باریکه در مرز منتقل شده و باعث افزایش جابجایی عرضی قابل ملاحظه‌ای شده است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله پدیده جابجایی گوس-هانچن در یک محیط نیمه‌بی‌نهایت یک‌بعدی حاوی فراماده هایپربولیک گرافن-پایه در بازتاب کلی یک موج گاوسی با قطبش TM از سطح، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند در صورت تحریک امواج سطحی در مرز فراماده و هوا میزان جابجایی عرضی قابل ملاحظه‌ای به دست می‌آید.

مرجع‌ها

[1] A. Namdar, R.Talebzadeh, K.Jamshidi-Ghaleh, “Surface wave-induced enhacement of the Goos-Hanchen shift in single negative one-dimensioal photonic crystal”, Optics & Laser Technology, Vol. 49, pp. 183–187, 2013.

[2] IV. Shadrivov, AA. Zharov, YS. Kivshar, “Giant goos-Hanchen effect at the reflection from left-handed metamaterials”, Applied Physics Letters Vol. 83, No. 13, pp. 2713-2715, 2003.

[3] M. Kalafi, A. Soltani-Vala, J. Barvestani “Surface optical waves in semi-infinite one-dimensional PC with a thin nonlinear cap layer”, Optics Communications, Vol. 272, pp. 403-406, 2007.

[4] A. Madani and S. Roshan-Entezar; “Surface polaritons of one-dimensional photonic crystals containing graphene monolayers”; Superlattices and Microstructures, Vol. 75, pp. 692-700, 2014.

[5] A. Poddubny, I. Iorsh, P.Belov and Y.Kivshar; “Hyperbolic metamaterials”; Nature Photonics; Vol. 243, pp. 948-957, 2013.

[6] G.W. Hanson, “Quasi-transverse electromagnetic modes supported by a graphene parallel-plate waveguide”; J. Appl. Phys. Vol.104, pp. 084314–5, 2008.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-02]