بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

تنظیم پذیری بالای جابجایی گوس-هانچن برای ساختار مبتنی بر گرافن و کاربرد آن در سوئیچینگ نوری

علی فرمانی[۱]، مهدی میری[۱] و محمدحسین شیخی[۱]

[۱]شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

چکیده - در این مقاله به‌صورت تحلیلی یک مدل مداری به منظور محاسبه جابجایی بزرگ و تنظیم‌پذیر گوس- هانچن مُدهای *TM* در یک ساختار مبتنی بر گرافن را بررسی می‌کنیم. در این ساختار تزویج پرتو نور ورودی به امواج سطحی سبب افزایش بسیار زیاد جابجایی گوس- هانچن می‌شود. از طرف دیگر نشان داده شده است که جابجایی جانبی بزرگ را می‌توان از طریق کنترل ویژگی‌های امواج سطحی به‌وسیله اعمال ولتاژ مناسب به گرافن (و تنظیم مشخصات الکترونیکی گرافن) کنترل کرد. برای این منظور ابتدا یک مدل مداری برای ساختار مبتنی بر گرافن پیشنهاد شده و با استفاده از این مدل ضریب بازتاب محاسبه‌شده است. سپس براساس تقریب فاز ایستا، فاز ضریب بازتاب برای محاسبه جابجایی گوس- هانچن بکار رفته است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که با تزویج بین نور ورودی و امواج سطحی میزان جابجایی گوس- هانچن تا بیش از ۱۰۰ برابر طول‌موج ورودی به دست می‌آید. علاوه بر آن، این جابجایی بسیار بزرگ با ولتاژ اعمالی کمی در حدود ۸ ولت قابل تنظیم است؛ بنابراین این ساختار برای سوئیچ‌های تنظیم‌پذیر با پهنای باند وسیع پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه- پلاسمون های سطحی، سوئیچ گرافنی، جابجایی گوس-هانچن، هدایت دینامیکی گرافن.

Tunable Giant Goos-Hänchen Shift from a Graphene Containing Structure and its Application in Optical Switching

Ali Farmani, Mehdi Miri, and Mohammad Hossein Sheikhi

Shiraz, Shiraz University, Department of Electrical and Computer Engineering

Abstract- We analytically investigate distributed circuit modeling of the tunable-enhanced Goos-Hänchen shift of light beams from a Graphene containing structure which supports TM surface waves. Here the coupling of the incident wave to the surface modes of the structure is used to enhance the Goos-Hänchen shift of the totally reflected wave. It is also shown that this large lateral shift can be controlled trough controlling the dispersion properties of the surface modes by applying an electrical voltage to the Graphene layer. A distributed circuit model is proposed for the Graphene containing structure and used to calculate the reflection coefficient of the structure. Phase of the reflection coefficient is then used to calculate the Goos-Hänchen shift. Our calculations show that by coupling the incident wave to the surface modes of the structure large Goos-Hänchen shift as high as 100 times of the free space wavelength can be achieved. Furthermore this large shift can be tuned by apply relatively small voltages in order of 8 volts to the structure. Therefore, the proposed structure can be used for adjustable broadband switches.

Keywords: Surface Plasmon, Graphene Switch, Goos-Hänchen Shift, Graphene Surface Conductivity.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

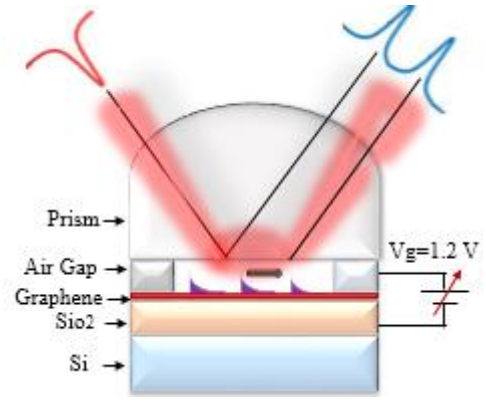
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

اثر گوس-هانچن درواقع جابجایی مکانی (در راستای مرز) بین پرتوی بازتاب شده و پرتو تابیده شده را هنگامی‌که بازتاب کلی داخلی در مرز دو محیط رخ دهد، نشان می‌دهد [۱]. با توجه به ویژگی‌های جذاب این اثر، از آن به‌منظور طراحی المان‌های اپتیکی همچون لیزر، سوئیچ، فیلتر استفاده‌شده است [۲]. در ساختارهای متداول معمولاً اثر جابجایی گوس-هانچن خیلی کوچک‌تر از عرض پرتو تابیده‌شده است و برای جابجایی بیشتر، ساختارهای بزرگ‌تر و همچنین بلوره‌های فوتونیکی پیشنهاد شده‌اند [۳]. همچنین در ساختارهای چندلایه امکان انتشار پلاسمون های سطحی در آن‌ها وجود دارد. برای مثال، تَنگ یک ساختار چندلایه به‌منظور افزایش جابجایی جانبی پیشنهاد داد [۴]؛ اما در این ساختار برای رسیدن به حداکثر جابجایی با توجه عدم تنظیم‌پذیری فلزات نجیب می‌بایست ضخامت لایه‌ی تزویج را تغییر می‌دادند. به‌طور مشابه، زِلر یک ساختار اُتو را پیشنهاد داد [۵]. در ساختارهای ذکرشده، با تزویج بین پرتوی نور ورودی و امواج سطحی، جابجایی جانبی ثابت و در مرتبه عرض پرتوی نور ورودی ایجاد می‌شدند. علاوه بر فلزات نجیب، ساختارهایی شامل مواد با خواص اپتیکی قابل تنظیم معرفی شدند که از آن جمله: فرا موادها، فرا موادهای هایپربولیک و فوتونیک کریستال هستند [۳, ۶]؛ اما در همه این ساختارها پروسه ساخت نیاز به لیتوگرافی پیچیده‌ای دارد. گرافن تک لایه یک ساختار دوبعدی از اتم‌های کربن است که گاف انرژی بین باند هدایت و ظرفیت صفر است. در این ماده امکان کنترل هدایت با اعمال ولتاژ گیت خارجی فراهم می‌شود و این عملکرد مهم‌ترین ویژگی گرافن نسبت به طلا برای طراحی سوئیچ‌های پلاسمونیکی باقابلیت تنظیم است. علاوه بر آن، گرافن دارای تلفات بسیار کم نسبت به فلزات نجیب بوده و بنابراین امکان انتشار پلاسمون های سطحی برای طول انتشار بیشتر را فراهم می‌کند. از طرفی قابلیت تنظیم گاف انرژی گرافن با اعمال ولتاژ خارجی، امکان تنظیم جابجایی جانبی در یک پیکربندی ثابت را فراهم می‌کند؛ بنابراین با تزویج مناسب نور ورودی با یک ساختار مبتنی بر گرافن، حداکثر میزان جابجایی گوس-هانچن می‌تواند رخ دهد و می‌توان از طریق اعمال ولتاژ خارجی این جابجایی را کنترل کرد [۷]. تنظیم‌پذیری گوس-هانچن در ساختارهای مبتنی بر گرافن در بسیاری از مقالات موردبررسی قرارگرفته است، اما به دلیل عدم توجه به تزویج مناسب نور ورودی و پلاسمون های سطحی در بسیاری از این ساختارها اندازه جابجایی گوس-هانچن کم هستند. در این مقاله به منظور در نظر گرفتن تزویج مناسب بین نور ورودی و امواج سطحی گرافن، یک مدل مداری به‌صورت تحلیلی برای دستیابی به حداکثر جابجایی جانبیِ مد TM پیشنهادشده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند هنگامی‌که تزویج مناسب بین نور ورودی و امواج سطحی گرافن رخ دهد جابجایی گوس-هانچن در مرتبه ۱۰۴ برابر طول‌موج ورودی رخ می‌دهد. علاوه بر آن این جابجایی جانبی با اعمال ولتاژ نسبتاً کم خارجی قابل تنظیم است.

۲- مدل ساختار و تئوری

در شکل ۱ ساختار پیشنهادی شامل مواد غیر مغناطیسی منشور- هوا- گرافن- سیلیکا- و سیلیکون نشان داده‌شده است. در این ساختار به دلیل بالا بودن ثابت انتشار گرافن، پلاسمون های سطحی به‌سادگی تحریک نمی‌شوند بنابراین منشور با ضریب شکست ۱,۵ مورداستفاده قرارگرفته شده است. برای تزویج مناسب نور ورودی با گرافن ضخامت لایه هوا در مرتبه طول‌موج ورودی در نظر گرفته‌شده است. یک لایه گرافن باضخامت ۰,۳ نانومتر بر روی سیلیکا قرارگرفته است. در شرایط بازتاب کلی، نور منعکس‌شده نسبت به نقطه بازتابی پیش‌بینی‌شده در نور هندسی دارای یک جابجایی جانبی هست که به نام جابجایی (اثر) گوس-هانچن شناخته می‌شود.



شکل ۱: ساختار پیشنهادی مبتنی بر گرافن برای اثر گوس- هانچن

برای اعمال ولتاژ خارجی بر روی لایه گرافن یک اتصال اهمی از جنس طلا در فاصله هوایی بین منشور و گرافن در

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

دو طرف شکل ۱ درنظر گرفته شده است [۸]. در این مقاله هدایت دینامیکی گرافن را با رابطه (۱) نشان داده‌ایم [۷]:

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

در این حالت هدایت دینامیکی گرافن در دو ترم هدایت میانی و هدایت داخلی تعریف می‌شود. رابطه (۲) هدایت دینامیکی را در فرمولاسیون Kubo نشان می‌دهد [۷].

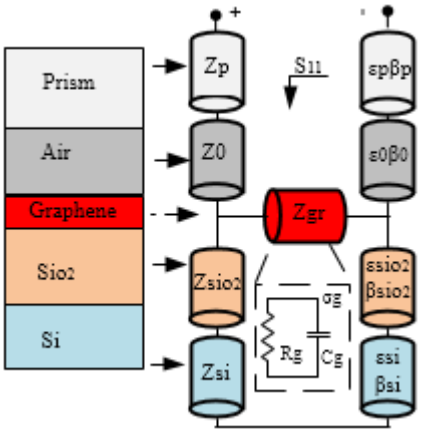
$$\sigma_{intra} = -j\frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar^2(\omega - j\tau^{-1})}\left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2\ln\left(e^{-\mu_c/k_B T}+1\right)\right]$$
$$\sigma_{inter} = -j\frac{e^2}{4\pi\hbar}\ln\left(\frac{2|\mu_c| - (\omega - j\tau^{-1})\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - j\tau^{-1})\hbar}\right) \qquad (2)$$

که در رابطه بالا e بار الکترون، k_B ثابت بولتزمن، $\tau^{-1} = \Gamma$ نرخ پراکندگی، $\hbar$ ثابت پلانک کاهش‌یافته، μ_c پتانسیل شیمیایی هستند. با توجه به رابطه (۲) هنگامی‌که پتانسیل شیمیایی برابر مقدار صفر است ($\mu_c = 0$) ترم هدایت داخلی نیز صفر خواهد بود ($\sigma_{intra} = 0$). درصورتی‌که میزان ولتاژ اعمالی کم باشد و محدوده پتانسیل شیمیایی $0 < |\mu_c| < \hbar\omega/2$ باشد، ترم هدایت میانی (σ_{inter}) غالب خواهد بود. در این حالت امواج سطحی TE قابلیت انتشار دارند. با افزایش ولتاژ اعمالی، محدوده پتانسیل شیمیایی $|\mu_c| > \hbar\omega/2$ خواهد شد و ترم هدایت داخلی (σ_{intra}) در محدوده فرکانس‌های تراهرتز ظاهر می‌شود و پلاسمون های سطحی TM اجازه انتشار می‌یابند. در این مقاله هدف تحریک و انتشار امواج سطحی TM هست.

۲-۱- مدل مداری ساختار پیشنهادی

در شکل ۲ برای محاسبه جابجایی ساختار چندلایه پیشنهادشده، یک مدل مداری پیشنهاد کرده‌ایم که در آن هر لایه با یک خط انتقال مدل شده است. در این روش با استفاده از ماتریس خط انتقال و در نظر گرفتن شرایط مرزی، بازتاب نوری از سطح گرافن محاسبه‌شده است. برای مدل‌سازی مداری گرافن در ساختار پیشنهادشده و همچنین تحریک مُدهای TM فقط ترم هدایت داخلی در گرافن را به‌صورت ترم غالب در نظر گرفته‌ایم ($\mu_c \neq 0$) بنابراین هدایت دینامیکی گرافن را با رابطه (۳) نشان می‌دهیم.

$$\sigma_g = \sigma_{intra} = \frac{\sigma_0}{(1 + j\omega\tau)} \qquad (۳)$$



شکل ۲: مدل مداری ساختار پیشنهادی ما (طراحی شده با نرم افزار ویزیو) برای جابجایی گوس- هانچن

با توجه به رابطه (۳) هدایت دینامیکی گرافن را با امپدانس معادل ($Z = R/1 + J\omega RC$) یک مدار RC موازی مدل کرده‌ایم. میزان جابجایی از روش فاز ایستاده که در رابطه (۴) نشان داده‌شده، به‌دست‌آمده است: از بخش مدل و تئوری مرجع [۷].

$$S = D = -\frac{\partial\phi}{\partial k_x} = -\frac{\partial\phi}{\partial(k_0 n_1 \sin\theta)} \qquad (۴)$$

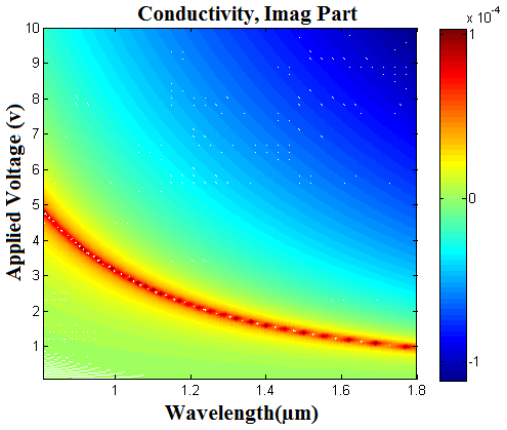
۲-۲- بحث و نتایج محاسبات

با درنظر گرفتن شرایط تزویج مناسب بین پرتو نور ورودی از منشور و پلاسمون های سطحی گرافن، موج های سطحی بر روی گرافن امکان انتشار پیدا می کنند. بنابراین باتوجه تنظیم پذیر بودن هدایت دینامیکی گرافن طول انتشار موج های سطحی را می توان کنترل کرد. پس از انتشار امواج سطحی به میزان $S/\lambda_0 = D/\lambda_0$، پرتو نور بازتاب می کند که این جابجایی جانبی نور بازتاب شده (شکل ۱)، بیان کننده پدیده گوس هانچن است. در این مقاله تنظیم‌پذیری جابجایی جانبی با اعمال ولتاژ خارجی بر روی گرافن صورت گرفته است. ترم موهومی هدایت دینامیکی گرافن بر اساس روش Kubo در بازه طول‌موج ۱,۸-۰,۸ میکرومتر با ولتاژ اعمالی بین ۰-۱۰ ولت، محاسبه‌شده و در شکل ۳ نشان داده است. با توجه به شکل، مرز انتشار مدهای سطحی با اعمال ولتاژ خارجی قابل‌کنترل می‌باشند. با توجه به شکل، با افزایش ولتاژ اعمالی، محدوده پتانسیل شیمیایی

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

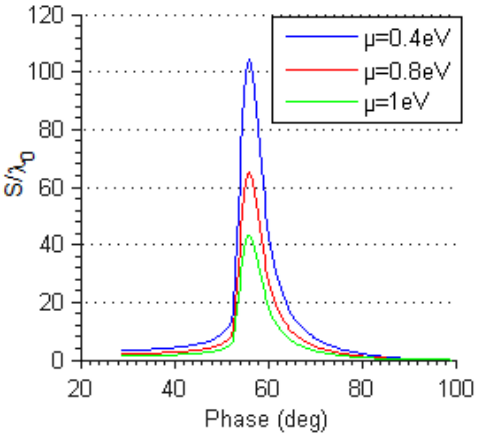
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

$|\mu_c| > \hbar\omega/2$ خواهد شد و ترم هدایت داخلی (σ_{intra}) غالب خواهد شد و پلاسمون های سطحی TM اجازه انتشار می‌یابند.



شکل ۳: ترم موهومی هدایت دینامیکی گرافن

با توجه به مدل مداری ساختار پیشنهاد شده (بخش ۲-۱) و با استفاده از روش ماتریس انتقال، ضریب بازتاب بدست آمده و با استفاده از روش فاز ایستاده: $S = -\frac{\partial\phi}{\partial k_x}$ (رابطه (۴)) جابجایی گوس- هانچن محاسبه می شود. در شکل ۴ جابجایی گوس-هانچن با توجه به زاویه نور ورودی برای ساختار پیشنهادی نشان داده‌شده است.



شکل ۴: تنظیم جابجایی جانبی براثر اعمال ولتاژ خارجی بر گرافن

با توجه به شرایط بالا پرتو نور ورودی سبب تحریک پلاسمون پلاریتون های سطحی مُد TM خواهد شد. درصورتی‌که زاویه نور ورودی ۵۷٫۵ درجه باشد بیشترین میزان جابجایی نسبت به طول‌موج حدود ۱۰۴ با ولتاژ خارجی ۱٫۲ ولت (پتانسیل شیمیایی ۰٫۴ الکترون‌ولت) خواهد شد و کمترین جابجایی برای ۸ ولت اعمالی در حدود ۴۵ برابر طول‌موج ورودی است.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل مداری به‌منظور جابجایی تنظیم‌پذیر و بالای گوس- هانچن در یک ساختار مبتنی بر گرافن به‌صورت تحلیلی بررسی گردید. همچنین نشان داده شد با ایجاد تزویج بین نور ورودی و امواج سطحی، جابجایی گوس- هانچن می‌تواند از طریق کنترل هدایت دینامیکی گرافن و ولتاژ اعمالی کنترل شود؛ بنابراین میزان جابجایی گوس- هانچن تا ۱۰۴ برابر طول‌موج ورودی به دست آمد؛ بنابراین این ساختار برای کاربردهای اپتیکی از جمله سوئیچ‌های با قابلیت تنظیم‌پذیری بالا پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[۱] F. Goos and H. Hänchen, "Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion," Annalen der Physik, vol. 436, pp. 333-346, 1947.

[۲] Y. Wang, Y. Liu, and B. Wang, "Tunable electron wave filter and Goos–Hänchen shift in asymmetric graphene double magnetic barrier structures," Superlattices and Microstructures, vol. 60, pp. 240-247, 2013.

[۳] M. Miri, A. Naqavi, A. Khavasi, K. Mehrany, S. Khorasani, and B. Rashidian, "Geometrical approach in physical understanding of the Goos-Haenchen shift in one-and two-dimensional periodic structures," Optics letters, vol. 33, pp. 2940-2942, 2008.

[٤] T. Tang, X. He, and W. Liu, "Large lateral shift in a multi-layer waveguide with indefinite media," Optik-International Journal for Light and Electron Optics, vol. 12 ,٥pp. 6459-6461, 2014.

[٥] M. A. Zeller, M. Cuevas, and R. A. Depine, "Critical coupling layer thickness for positive or negative Goos–Hänchen shifts near the excitation of backward surface polaritons in Otto-ATR systems," Journal of Optics, vol. 17, p.٢٠١٥ ,٠٥٥١٠٢ .

[٦] L. Luo and T. Tang, "Goos-Hänchen effect in Kretschmann configuration with hyperbolic metamaterials," Superlattices and Microstructures, vol. 94, pp. 85-92, 2016.

[٧] A. Madani and S. R. Entezar, "Tunable enhanced Goos–Hänchen shift in one-dimensional photonic crystals containing graphene monolayers," Superlattices and Microstructures, vol. 86, pp. 105-110, 2015.

[٨] L. Jiu-Sheng, W. Jing-Fang, and Z. Le, "Giant tunable Goos–Hänchen shifts based on prism/graphene structure in terahertz wave region," IEEE Photonics Journal, vol. 6, pp. 1-7, 2014.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]