

کنترل طول انتشار و عمق نفوذ امواج پلاسمون پلاریتون سطحی در ساختار موجبر گرافنی

خوب آفرین دوست^۱، سمیه^۱؛ سیاپوش، وحید^۱؛ عسگری، اصغر^۱

^۱ پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده

در این مقاله معادلات پاشندگی امواج پلاسمون پلاریتون سطحی در یک ساختار با دو لایه گرافن که توسط یک لایه دی الکتریک از هم جدا شده‌اند، به صورت عددی حل شده است. با اعمال ولتاژ به ساختار مذکور و تغییر تراز فرمی خصوصیات انتشاری پلاسمون‌های سطحی قابل کنترل است. تراز فرمی به سه فاکتور ولتاژ، ضخامت و ثابت دی الکتریک لایه دی الکتریک میانی بستگی دارد که تاثیر این پارامترها بر روی طول انتشار و عمق نفوذ نرمالیزه مد متقارن و پادمقارن بررسی شده‌اند.

Control of Propagation length and Penetration Depth of Surface Plasmon Polaritons in Graphene Waveguide Structure

Khoubafarin Doust, Somaiyeh¹; Siahpoush, Vahid¹; Asgari, Asghar¹

¹research Institute of Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz

Abstract

In this paper the dispersion equation of surface plasmon polaritons (SPPs) in a structure with two graphene layers separated by a dielectric layer is numerically solved. By applying voltage to this structure, we can tune propagation properties of SPPs through Fermi energy of graphene layers which depends on bias voltage, thickness and permittivity of middle dielectric layer. The effect of these parameters on normalized propagation length and penetration depth of symmetric and antisymmetric SPPs waves is investigated.

PACS No. 68.35

در این مقاله به بررسی اثرات اعمال ولتاژ بر روی خواص انتشاری امواج SPP در یک ساختار موجبر گرافنی می‌پردازیم و اثر تغییر ضخامت لایه دی الکتریک میانی و همچنین اثر تغییر ثابت دی الکتریک به عنوان پارامترهایی برای تنظیم خواص انتشاری SPP مورد بررسی قرار می‌گیرد.

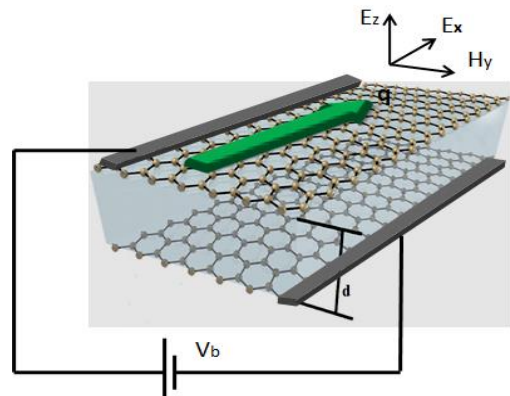
تئوری

در شکل ۱ طرحواره‌ای از ساختار موجبر مورد مطالعه نشان داده شده است که شامل دو لایه گرافن است که به وسیله یک دی الکتریک به ضخامت d و ثابت دی الکتریک ϵ_d از هم جدا شده‌اند و بین دو لایه گرافن ولتاژ V_b اعمال شده است. محیط دی الکتریک

مقدمه

گرافن همانند فلزات توانایی حمل پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPP) را دارند که علاوه بر کم بودن اتلافات آن در گستره تراهرتز، دارای این مزیت مهم هستند که در مقایسه با فلزات خواص اپتوالکترونیکی آن با آلاینش ناخالصی، اعمال میدان الکتریکی یا مغناطیسی و یا اعمال ولتاژ خارجی قابل تنظیم می‌باشد [۱]. از جمله ساختارهای گرافنی که امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته است، موجبر تخت شامل دو لایه گرافن است که به وسیله یک دی الکتریک از هم جدا شده‌اند. این ساختار توانایی حمل مدهای پلاسمونی با قطبش TM و TE را دارد [۲].

بالا و پایین لایه‌های گرافن از یک نوع ماده با ثابت دی‌الکتریک ϵ_1 در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: طرحواره موجبر مورد مطالعه که تحت ولتاژ V_b است [۲]. ما بررسی خود را به امواج SPP با قطبش TM محدود خواهیم کرد زیرا به دلیل مثبت بودن قسمت موهومی رسانندگی در ناحیه وسیعی از فرکانسها انتشار SPP ها با قطبش TE در این ناحیه ممنوع است [۳]. میدان مغناطیسی وابسته به موج SPP که با بردار موج q و قطبش TM در جهت x منتشر می‌شود به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$H_y = \begin{cases} A e^{K_1(z+d/2)} e^{i(qx-ot)} & z < -d/2 \\ (B_1 e^{K_2 z} + B_2 e^{-K_2 z}) e^{i(qx-ot)} & |z| < d/2 \\ C e^{-K_1(z-d/2)} e^{i(qx-ot)} & z > d/2 \end{cases} \quad (1)$$

مولفه‌های E_x و E_z آن نیز از طریق معادلات ماکسول بدست می‌آید. با اعمال شرایط مرزی در $x = \pm d/2$ برای مولفه مماسی میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌توان رابطه پاشندگی را محاسبه کرد. اگر رسانندگی هر دو لایه گرافن یکسان باشد. رابطه پاشندگی به شکل زیر در می‌آید [۳].

$$\left(i\omega \frac{\epsilon_1}{K_1} - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right) \tanh\left(\frac{K_2 d}{2} \right) + i\omega \frac{\epsilon_2}{K_2} = 0 \quad (2)$$

$$\left(i\omega \frac{\epsilon_1}{K_1} - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right) + i\omega \frac{\epsilon_2}{K_2} \tanh\left(\frac{K_2 d}{2} \right) = 0 \quad (3)$$

در معادله‌های ۲ و ۳ که به ترتیب مربوط به مدهای متقارن و پادمتقارن است، $K_i = \sqrt{q^2 - \epsilon_i \frac{\omega^2}{c^2}}$ $i=1,2$ و σ رسانندگی

گرافن است که به صورت زیر بیان می‌شود [۵و۴].

$$\sigma(\omega) = \sigma(\omega)^{intra} + \sigma(\omega)^{inter} \quad (4)$$

$$\sigma(\omega)^{inter} = \frac{e^2}{4\hbar} \left[0.5 + \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{\hbar(\omega+i\gamma) - 2\mu}{2T} \right) \right] - \frac{e^2}{4\hbar} \left[\frac{i}{2\pi} \ln \frac{(\hbar(\omega+i\gamma) + 2\mu)^2}{(\hbar(\omega+i\gamma) - 2\mu)^2 + (2T)^2} \right]$$

$$\sigma(\omega)^{intra} = \frac{2ie^2 T}{\pi \hbar^2 \omega} \ln \left[2 \cosh\left(\frac{\mu}{2T} \right) \right]$$

رسانندگی گرافن از دو بخش مربوط به گذارهای داخل بانندی و بین بانندی تشکیل شده است که علاوه بر فرکانس (ω) به پارامترهای دما (T) ، انرژی فرمی (μ) و نرخ پراکندگی الکترون-فونون (γ) بستگی دارد. در این مقاله ارتباط بین این پارامترها به صورت $\gamma = \gamma_0 \mu/T$ در نظر گرفته شده است که در آن γ_0 در دمای اتاق برابر 3×10^{11} s می‌باشد.

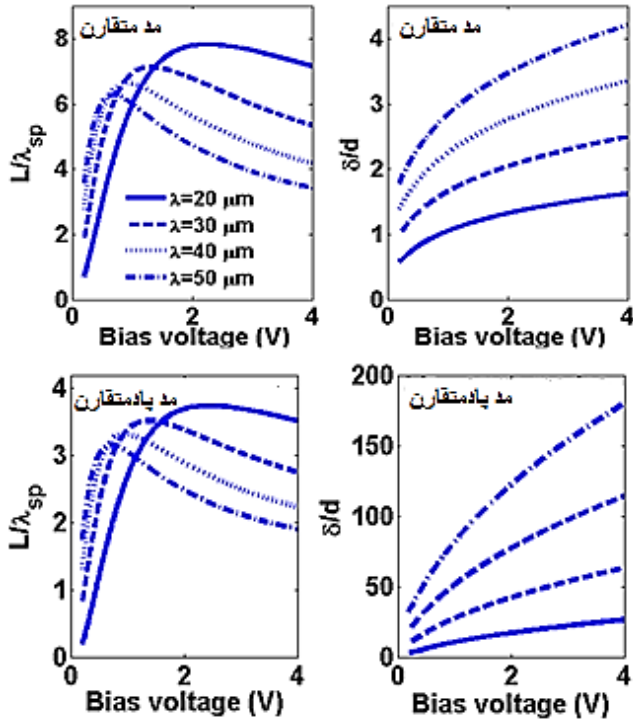
اثر اعمال ولتاژ

یکی از روشهای تنظیم خصوصیات اپتیکی گرافن اعمال ولتاژ V_b بین دو لایه گرافن است. اعمال ولتاژ موجب افزایش چگالی الکترونها در لایه بالا و حفره‌ها در لایه پایین به یک اندازه می‌شود بنابراین مقدار انرژی فرمی در هر دو لایه یکسان ولی با علامت متفاوت است. اعمال ولتاژ باعث به وجود آمدن یک اختلاف پتانسیل به اندازه $\left(V_b - 2\frac{\mu}{e} \right)$ بین دو لایه گرافن می‌شود. با استفاده از قضیه گاوس در فضای بین دو لایه گرافن، انرژی فرمی در حالت حدی $\mu \gg T$ به شکل زیر قابل محاسبه است [۶]. طبق رابطه ۵ به وسیله سه پارامتر d ، ϵ_2 و V_b می‌توان انرژی فرمی و در نتیجه خصوصیات اپتیکی گرافن را تنظیم کرد.

$$\mu = \pm \sqrt{\left(\frac{\pi \hbar^2 v_f^2 \epsilon_2 \epsilon_0}{de^2} \right)^2 + \frac{\pi \hbar^2 v_f^2 \epsilon_2 \epsilon_0 V_b}{ed}} - \frac{\pi \hbar^2 v_f^2 \epsilon_2 \epsilon_0}{de^2} \quad (5)$$

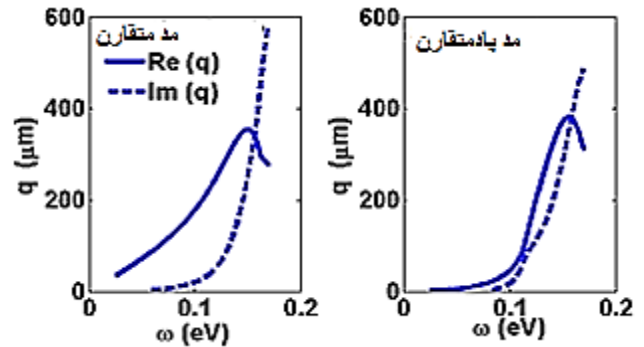
محاسبات عددی

عکس وجود دارد. پارامتر دیگری که به وسیله آن می‌توان خصوصیات اپتیکی گرافن را تنظیم کرد ضخامت لایه دی‌الکتریک میانی (d) است.



شکل ۳: اثر اعمال ولتاژ بر روی طول انتشار نرمالیزه و عمق نفوذ نرمالیزه SPP برای مد متقارن و مد پادمتقارن، $\epsilon_1=1$ و $\epsilon_2=5$ و $d=15$ nm در نظر گرفته شده است.

شکل ۴ تغییرات طول انتشار و عمق نفوذ SPP را به صورت تابعی از d نشان می‌دهد. با افزایش d، طول انتشار نرمالیزه هر دو مد ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر به ازای یک d معین طول انتشار نرمالیزه به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و مقدار این ماکزیمم با افزایش طول موج کاهش یافته و به سمت مقادیر بزرگتر d شیف‌ت می‌یابد. از نظر فیزیکی افزایش d علاوه بر اینکه جفت شدگی بین مدهای تشکیل یافته در هر فصل مشترک را کاهش می‌دهد، موجب کاهش انرژی فرمی و افزایش گذارهای باندی شده و در نتیجه میرایی SPP بیشتر می‌شود.



شکل ۲: نمودار پاشندگی مد متقارن و پادمتقارن. $\mu=0.1(eV)$ ، $d=15$ nm و $\epsilon_1=1$ و $\epsilon_2=5$ (nm) در نظر گرفته شده است.

از حل عددی معادلات پاشندگی (۲) و (۳) به روش نیوتن رافسون دو بعدی، توسط نرم‌افزار متلب، ثابت انتشار q محاسبه می‌شود و نمودارهای پاشندگی برای هر دو مد متقارن و پادمتقارن در شکل ۲ رسم شده است. و از روی آن طول انتشار نرمالیزه (L/λ_{SPP}) و عمق نفوذ نرمالیزه (δ/d) قابل محاسبه خواهد بود. در شکل ۳، تغییرات طول انتشار و عمق نفوذ نرمالیزه SPP برای هر دو مد متقارن و پادمتقارن، بر حسب ولتاژ در طول موج‌های مختلف محاسبه شده است که نشان می‌دهد برای هر دو مد یک ولتاژ بهینه‌ای وجود دارد که به ازای آن طول انتشار SPP ماکزیمم می‌شود و عمق نفوذ با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد و در نتیجه جایگزیدگی کاهش می‌یابد. به ازای ولتاژهای بالا، طول موج‌های کوتاه‌تر همزمان طول انتشار نرمالیزه بزرگتر و عمق نفوذ کمتری دارند. بنابراین همزمان طول انتشار و عمق نفوذ بهبود می‌یابد که این خلاف رفتار معمول پلاسمون‌های سطحی است.

مطابق شکل ۳ مد متقارن دارای طول انتشار نرمالیزه بیشتر و عمق نفوذ نرمالیزه بهتری در مقایسه با مد پاد متقارن است. از نظر فیزیکی در ولتاژهای پایین به دلیل زیاد بودن گذارهای بین باندی SPP به شدت میرا می‌شود ولی با افزایش ولتاژ و محدود شدن گذارهای بین باندی طول انتشار SPP افزایش می‌یابد و از طرفی افزایش ولتاژ موجب افزایش چگالی حاملین و انرژی فرمی می‌شود در نتیجه گرافن بیشتر شبیه یک رسانای کامل عمل می‌کند و عمق نفوذ افزایش می‌یابد و در نتیجه جایگزیدگی کاهش می‌یابد. بنابراین در ولتاژهای پایین بین طول انتشار و جایگزیدگی رابطه

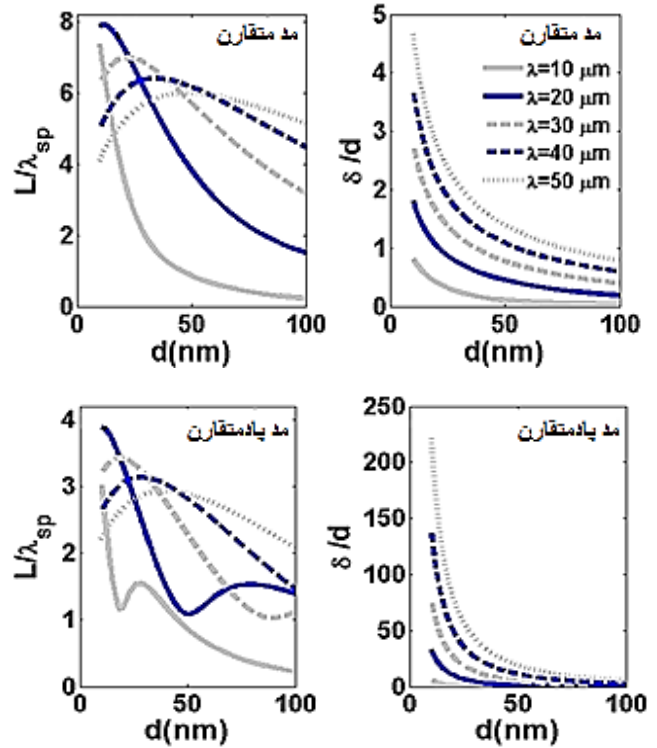
سومین پارامتر موثر در تنظیم خواص انتشاری SPP ثابت دی الکتریک لایه دی الکتریک میانی است. در شکل ۵ اثر تغییر ثابت دی الکتریک بر روی طول انتشار و عمق نفوذ نرمالیزه SPP بررسی شده است که نشان می دهد اگرچه تغییر ثابت دی الکتریک مقدار ماکزیمم طول انتشار نرمالیزه را تغییر نمی دهد ولی آن را به سمت مقادیر بزرگتر ولتاژ شیفتمی دهد.

نتیجه گیری

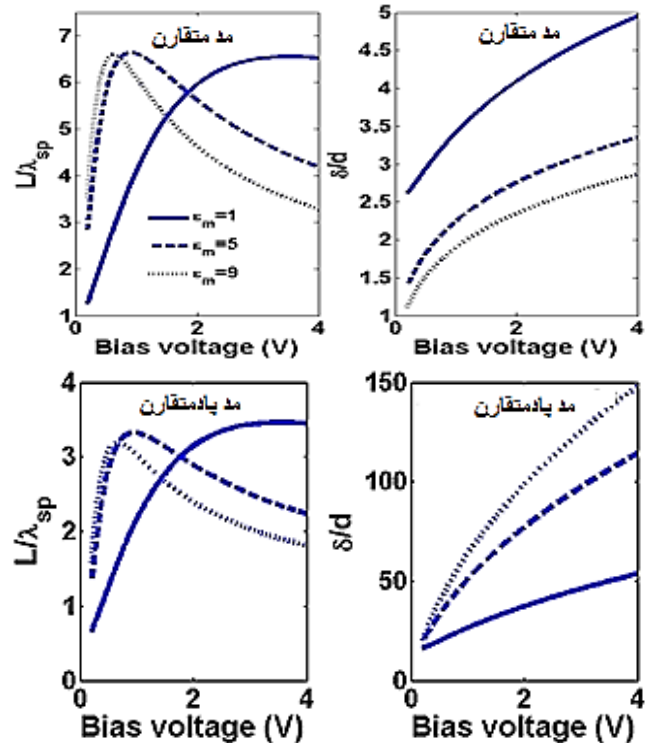
در این مقاله خواص انتشاری امواج SPP در یک موجبر گرانی تحت ولتاژ بررسی شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد که با اعمال ولتاژ و تغییر در ضخامت و ثابت دی الکتریک لایه میانی می توان خواص انتشاری هر دو مد متقارن و پادمقارن را کنترل کرد. تحت شرایط $\mu \gg T$ و $\hbar\omega > 2\mu$ ، برای هر دو مد، یک ولتاژ معینی وجود دارد که طول انتشار نرمالیزه SPP به بیشترین مقدار خود می رسد و عمق نفوذ نرمالیزه نیز با افزایش ولتاژ افزایش می یابد که به معنی کاهش جایگزیدگی است. در ولتاژهای بالاتر به ازای طول موج های کوتاهتر، طول انتشار نرمالیزه بیشتر و عمق نفوذ کمتر است که برای کاربرد موجبری بهتر است. برای هر دو مد به ازای یک d معین طول انتشار نرمالیزه ماکزیمم می شود و عمق نفوذ هر دو مد نیز با افزایش d کاهش می یابد. از طرفی تغییر ثابت دی الکتریک لایه میانی موجب شیفتم ماکزیمم مقدار طول انتشار نرمالیزه به سمت ولتاژهای بیشتر می شود. مد متقارن نسبت به مد پادمقارن دارای طول انتشار بیشتر و عمق نفوذ کمتر و در نتیجه جایگزیدگی بهتر است.

مرجع ها

- [1]. A.V. Savin and Y.S. Kivshar; "Vibrational Tamm states at the edges of graphene nanoribbons". *Physical Review B*. **81** (2010): 165418.
- [2]. P. I. Buslaev, I. V. Iorsh, I. V. Shadrivov, P. A. Belov, and Yu S. Kivshar. "Plasmons in waveguide structures formed by two graphene layers." *JETP letters* **97** (2013): 535-539.
- [3]. Yu. V. Bludov and A. Ferreira and N. M. R. Peres and M. I. Vasilevskiy; "A primer on surface plasmon-polaritons in graphene." *International Journal of Modern Physics B* **27** (2013): 1341001.
- [4]. L. A. Falkovsky and A. A. Varlamov. "Space-time dispersion of graphene conductivity; "The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems **56** (2007): 281-284.
- [5]. L. A. Falkovsky; "Optical properties of graphene." *Journal of Physics: Conference Series* vol. **129** (2008): 012004. IOP Publishing.
- [6]. D. Svintsov and V. Vyurkov and V. Ryzhii, and T. Otsuji. "Voltage-controlled surface plasmon-polaritons in double graphene layer structures." *Journal of Applied Physics* **113** (2013): 053701.



شکل ۴: تاثیر تغییر ضخامت لایه میانی بر روی طول انتشار و عمق نفوذ نرمالیزه SPP برای هر دو مد متقارن و پادمقارن. $\epsilon_1=1$, $\epsilon_2=5$ و $V_b=2\text{Vol}$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: طول انتشار و عمق نفوذ نرمالیزه SPP برای مد متقارن و مد پادمقارن در مواد دی الکتریک مختلف. $\lambda=20\mu\text{m}$ و $d=15\text{nm}$ در نظر گرفته شده است.