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

# تاثیر لایه گرافن بر انتشار امواج در موجبرهای تخت پلاسمونی

محمد نجفی حاجی‌ور، محمود حسینی فرزاد

بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

**چکیده – در این مقاله به بررسی ویژگی‌های گرافن و تاثیر آن بر یک موجبر تخت پلاسمونی پرداخته شده است. در ابتدا رفتار تابع دی‌الکتریک گرافن با تغییرات پتانسیل شیمیایی (انرژی فرمی) بررسی شده است، سپس وابستگی ضریب شکست گرافن به پتانسیل شیمیایی نیز مورد بحث قرار گرفته است. در عمل پتانسیل شیمیایی گرافن را می‌توان با روش‌های مختلفی از جمله با اعمال یک ولتاژ نسبتا کم به گرافن تغییر داد. در واقع با اعمال ولتاژ، جمعیت الکترونی اضافی به گرافن تزریق می‌شود که باعث می‌شود سطح تراز فرمی بالا برود و پدیده‌ای به نام انسداد پاولی باعث تغییر در قسمت موهومی گذردهی الکتریکی یا به طور معادل قسمت موهومی ضریب شکست گرافن می‌شود. از آنجا که میزان جذب نور با قسمت موهومی ضریب شکست رابطه دارد، می‌توان با اعمال یک ولتاژ متغیر با زمان، میزان جذب را در گرافن به صورت دینامیک دستکاری کرد. در پایان هم یک موجبر تخت پلاسمونی شامل یک لایه گرافن طراحی و با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شد که گرافن در معرض پلاسمون پولاریتون‌های سطحی قرار داشت و رفتار موجبر با تغییر پتانسیل شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفت. با افزایش پتانسیل شیمیایی در یک بازه خاص، مشاهده شد که توان عبوری موجبر افزایش قابل ملاحظه‌ای یافت.**

کلید واژه- موجبر پلاسمونی، گرافن، پتانسیل شیمیایی، گذردهی الکتریکی، روش کرامرز-کرونیگ

# The Effect of Graphene Layer on Wave Propagation in Planar Plasmonic Waveguide

M. Najafi Hajivar[1] and M. Hosseini- Farzad[1]

[1] Department of Physics, College of Science, Shiraz University

Abstract- In this paper we investigate the properties of graphene and its effect on a flat plasmonic waveguide. At first dielectric function of graphene by chemical potential (Fermi energy) changes was reviewed, then the dependence of the refractive index graphene to the chemical potential is also discussed. In practice chemical potential of graphene can be altered by applying various methods including applying voltage. Indeed by applying voltage an additional population of electrons is injected to graphene that lead to increase Fermi energy level and therefore a phenomenon named Pauli blocking will alter the imaginary part of electrical permittivity (or equivalently imaginary part of refractive index) of graphene. Because of relation between the absorption of light and imaginary part of refractive index of graphene, the absorption of light by graphene can manipulated dynamically by applying time-varying voltage. Finally a planar plasmonic waveguide with a graphene layer was designed and simulated, that graphene layer was exposed to surface plasmon polariton and waveguide behavior by changing the chemical potential was evaluated. By increasing the chemical potential in a specific interval, power transmission waveguide found a significant increase.

Keywords: Plasmonic Waveguide, Graphene, Chemical Potential, Permittivity, Kramers-Kronig method

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]



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

## ۱- مقدمه

رشد عظیم ترافیک انتقال داده و مخابرات در سال‌های اخیر، دانشمندان و پژوهشگران علم فوتونیک را بر آن داشته است که با استفاده از مواد جدید، ابزارهای فوتونی فوق سریع جهت انتقال حجم بسیار زیادی از داده‌ها در مدت زمان بسیار کم بسازند. موجبرهای نوری یکی از این ابزارها می‌باشد که می‌تواند نقش‌های مختلفی را در مدارات مجتمع نوری بر عهده بگیرد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به سوییچ‌ها و مدولاتورهای نوری اشاره کرد[۱]. از طرفی با ظهور زمینه نسبتا جدیدی در علم اپتیک به نام پلاسمونیک، راه‌های زیادی برای کوچک‌سازی ابزارهای فوتونی در برابر محققان گشوده است[۲]. هم‌چنین استفاده از مواد جدید با خواص الکترواپتیکی ویژه در دستور کار پژوهشگران قرار دارد. یکی از مهم‌ترین مواد جدیدی که توانسته بسیاری از خواسته‌های پژوهشگران علم فوتونیک را برآورده کند، گرافن است. گرافن که یک ساختار دوبعدی به شکل لانه زنبوری از اتم‌های کربن است، در سال ۲۰۰۴ توسط نووسلوف و گیم سنتز و معرفی شد. پس از آن گرافن برای مقاصد مختلفی در زمینه‌های گوناگون علوم و مهندسی به کار گرفته شده است[۳-۵]. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن کوک‌پذیری است، بدین معنی که با دستکاری انرژی فرمی یا همان پتانسیل شیمیایی آن می‌توان ویژگی‌های اپتیکی آن یعنی گذردهی الکتریکی (ضریب شکست) آن را تغییر داد. نکته بسیار مهم این است که این تغییرات بسیار سریع هستند، به طوری که گرافن در زمانی از مرتبه $10^{-13}$ ثانیه به اختلال خارجی پاسخ می‌دهد و از این بابت سریع‌ترین ماده قابل دسترس می‌باشد[۴].

در این مقاله در ابتدا به بررسی گرافن و ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود. نمودار تغییرات قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی و نیز قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست بر حسب پتانسیل شیمیایی یا همان انرژی فرمی با استفاده رابطه کرامرز-کرونیگ رسم شده است. سپس ساختار یک موجبر تخت پلاسمونی بررسی شده است که یک لایه گرافن بین فلز حامل پلاسمون‌های پولاریتون‌های سطحی و هسته موجبر قرار گرفته است. در پایان اثر تغییرات پتانسیل شیمیایی بر خروجی موجبر بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی این ساختار با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است.

## ۲- گرافن و ویژگی‌های آن

گرافن ساختار دو بعدی از یک لایه منفرد شبکه لانه زنبوری کربنی می‌باشد. گرافن به علت داشتن خواص فوق العاده در رسانندگی الکتریکی و رسانندگی گرمایی، چگالی بالا و تحرک پذیری حامل های بار، رسانندگی اپتیکی و خواص مکانیکی به ماده‌ای منحصربفرد تبدیل شده است. این سامانه جدید حالت جامد به واسطه این خواص فوق العاده به عنوان کاندیدای بسیار مناسب برای جایگزینی سیلیکون در نسل بعدی قطعه‌های فوتونیکی و الکترونیکی در نظر گرفته شده است و از این رو توجه کم سابقه‌ای را در تحقیقات بنیادی و کاربردی به خود جلب کرده است. در این بخش به بررسی تغییرات گذردهی الکتریکی و ضریب شکست گرافن بر حسب پتانسیل شیمیایی پرداخته می‌شود. در واقع پتانسیل شیمیایی گرافن را می‌توان با اعمال ولتاژ یا تاباندن نور کم یا زیاد کرد[۴]. رابطه پتانسیل شیمیایی گرافن با ولتاژ اعمالی به صورت زیر می‌باشد[۵]:

$$\mu_c = \hbar v_f \sqrt{\eta |V + V_0|} \qquad (۱)$$

که در آن $\hbar$ ثابت پلانک، $v_f$ سرعت فرمی الکترون‌ها در ساختار گرافن $(3 \times 10^6\ m/s)$، $\eta$ یک پارامتر وابسته به ساختار است که برای ساختارهای تخت معمولا مقدار آن برابر $9 \times 10^{16} m^{-2} V^{-1}$ قرار داده می‌شود و $V$ ولتاژ اعمالی به گرافن و $V_0$ انحراف ولتاژ ناشی از آلاییدگی طبیعی گرافن است که مقدار آن به کیفیت گرافن بستگی دارد و در حدود $-0.8\ V$ می‌باشد[۵].

### ۲-۱- گذردهی الکتریکی گرافن

رهیافت‌های مختلفی برای محاسبه گذردهی الکتریکی گرافن یا به طور معادل رسانندگی گرافن وجود دارد، که از جمله می‌توان به رابطه کوبو و رهیافت کرامرز-کرونیگ اشاره کرد. رهیافت کرامرز- کرونیگ وابستگی قسمت حقیقی و موهومی گذردهی گرافن را به انرژی نور فرودی و انرژی فرمی یا همان پتانسیل شیمیایی به ترتیب به صورت زیر می‌دهد[۴]:

$$\varepsilon_g'(E_p, E_f) = 1 + \frac{e^2}{8\pi E_p \varepsilon_0 d} ln\left[\frac{(E_p+2|E_f|)^2+\Gamma^2}{(E_p-2|E_f|)^2+\Gamma^2}\right] \qquad (۲)$$
$$- \frac{e^2}{\pi \varepsilon_0 d} \frac{|E_f|}{E_p^2 + \left(1/\tau\right)^2}$$

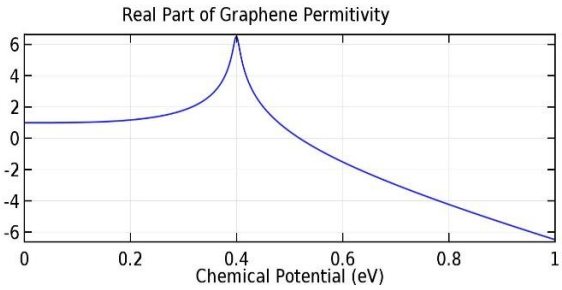


این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

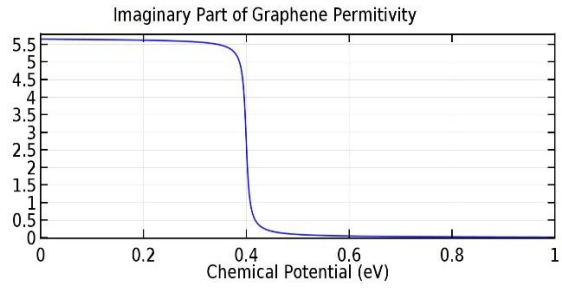
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]

$$\varepsilon_g''(E_p,E_f) = \frac{e^2}{84E_p\varepsilon_0 d}\left(1+\frac{1}{\tau}\left[\tan^{-1}\left(\frac{E_p-2|E_f|}{\Gamma}\right)-\tan^{-1}\left(\frac{E_p+2|E_f|}{\Gamma}\right)\right]\right)+\frac{e^2}{\pi\tau E_p\varepsilon_0 d}\frac{|E_f|}{E_p^2+(1/\tau)^2} \quad (۳)$$

که در آن‌ها $E_p$ انرژی فوتون فرودی، $E_f$ انرژی فرمی یا همان پتانسیل شیمیایی، $d$ ضخامت لایه گرافن که معمولا آن را در عمل برابر $1\,nm$ اختیار می‌کنند، $\Gamma$ پهن‌شدگی گذار بین نواری در طیف بازتابی گرافن است که مقدار آن برابر 110 mev (۱۱۰ میلی الکترون ولت) می‌باشد و $(1/\tau)$ نرخ پراکندگی حامل‌ها است که به خاطر تاثیر ناچیز آن روی ثابت دی‌الکتریک غالبا مقدار آن را برابر صفر قرار می‌دهند. نمودار گذردهی گرافن بر حسب انرژی فرمی در طول موج $1550\,nm$ در نمودار ۱ آمده است. نکته حایز اهمیت این است که در رابطه‌های بالا جملات مختلفی وجود دارد که نشان دهنده این است که هم گذارهای بین-نواری و هم گذارهای درون-نواری در نظر گرفته شده است[۴].




نمودار ۱) قسمت حقیقی گذردهی گرافن بر حسب پتانسیل شیمیایی، برای انرژی فوتون با طول موج 1550 nm




نمودار ۲) قسمت موهومی گذردهی گرافن بر حسب پتانسیل شیمیایی، برای انرژی فوتون با طول موج 1550 nm

## ۲-۲- ضریب شکست گرافن

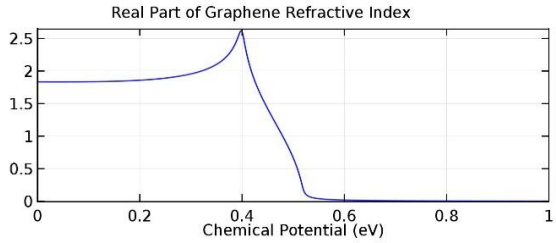
با توجه به رابطه ضریب شکست و گذردهی الکتریکی، می‌توان ضریب شکست گرافن را نیز بر حسب پتانسیل شیمیایی به دست آورد[۲]:

$$\hat{n} = n + ik \quad (۴)$$

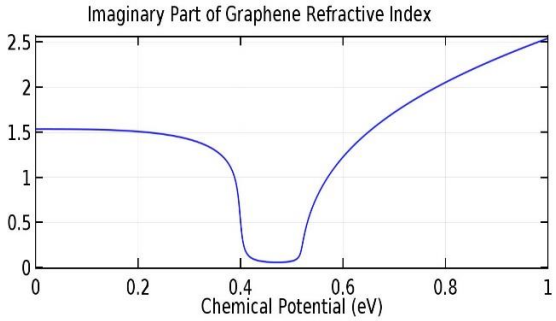
$$\sqrt{\varepsilon_g'^2+\varepsilon_g''^2}+\varepsilon_g'=2n^2 \quad (۵)$$

$$k=\frac{\varepsilon_g''}{2n} \quad (۶)$$

که در آن n قسمت حقیقی ضریب شکست و k قسمت موهومی ضریب شکست گرافن می‌باشد. نمودار وابستگی قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست گرافن به پتانسیل شیمیایی به ترتیب در نمودارهای ۳ و ۴ آمده است.




نمودار ۳) قسمت حقیقی ضریب شکست گرافن بر حسب پتانسیل شیمیایی




نمودار ۴) قسمت موهومی ضریب شکست گرافن بر حسب پتانسیل شیمیایی

همان طور که در شکل‌های بالا پیداست با افزایش پتانسیل شیمیایی در یک بازه خاص (این بازه در نمودار ۸ به طور جداگانه ترسیم شده است) قسمت موهومی ضریب شکست گرافن به شدت افت می‌کند. این وضعیت به دلیل پدیده‌ای به نام انسداد پاولی، به وجود می‌آید. به این ترتیب که با افزایش سطح انرژی فرمی یا همان پتانسیل شیمیایی الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌روند و به دلیل اصل طرد پاولی اجازه ورود الکترون‌های بیشتر از نوار ظرفیت به نوار رسانش را نمی‌دهند. بنابراین الکترون‌های نوار ظرفیت نمی‌توانند فوتون‌های عبوری را جذب کنند، یا به عبارت دیگر جذب با افزایش پتانسیل شیمیایی کاهش می‌یابد و گرافن در برابر نور شفاف می‌شود[۴].

## ۲-۳- ساختار موجبر شامل گرافن

در نمودار ۵ یک طرح کلی از ساختار مورد بحث آمده است. این ساختار شامل یک موجبر سیلیکونی است که زیر لایه آن



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

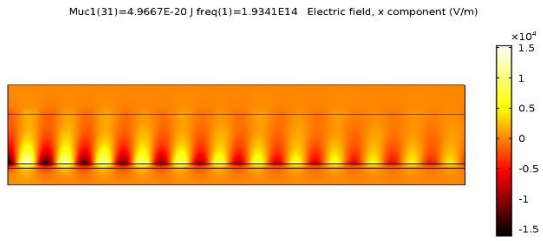
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]

$SiO_2$ است. یک لایه طلا برای پشتیبانی از پولاریتون پلاسمون‌های سطحی در زیر سیلیکون قرار گرفته است. گرافن تک-لایه نیز برای برهم‌کنش بهتر با میدان الکتریکی موج انتشار یافته در موجبر بین طلا و سیلیکون قرار گرفته است. نور از سمت چپ وارد ساختار می‌شود و طبیعتا از سمت راست خارج می‌شود.



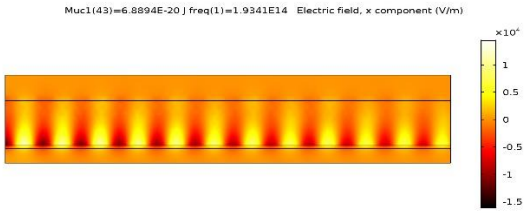

نمودار ۵) ساختار موجبر تخت پلاسمونی با حضور گرافن، طول ساختار ۵ میکرومتر، ضخامت زیرلایه $SiO_2$ ۲۰۰ نانومتر، ضخامت لایه طلا ۵۰ نانومتر، ضخامت گرافن یک نانومتر، ضخامت سیلیکون که هسته اصلی موجبر است، ۶۰۰ نانومتر، ضخامت لایه هوا حدود ۳۵۰ نانومتر می‌باشد (در این شکل مقیاس رعایت نشده است).

نمودار ۶ توزیع مولفه x میدان الکتریکی را با اعمال پتانسیل شیمیایی 0.31 eV نشان می‌دهد. با مقایسه آن با نمودار ۷ که همین کمیت را با اعمال پتانسیل شیمیایی 0.43 eV نشان می‌دهد، به خوبی می‌توان کاهش جذب را با افزایش پتانسیل شیمیایی مشاهده کرد.




نمودار ۶) مولفه x میدان الکتریکی با اعمال پتانسیل شیمیایی برابر 0.31 eV

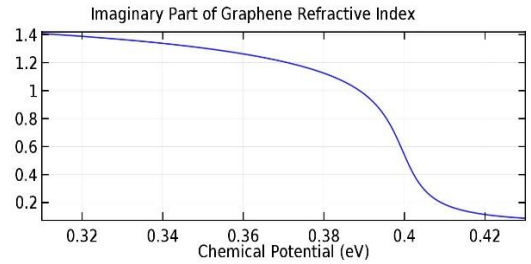
با افزایش پتانسیل شیمیایی میدان الکتریکی درون موجبر قوی‌تر شده و در پتانسیل شیمیایی برابر 0.43 eV به بیشینه خود می‌رسد و پس از آن دوباره شروع به کاهش می‌کند که مورد بحث ما نیست.



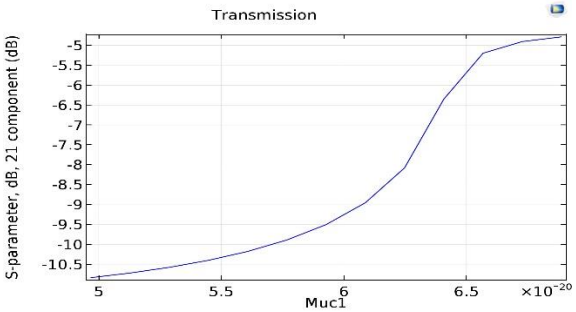

نمودار ۷) مولفه x میدان الکتریکی با اعمال پتانسیل شیمیایی برابر 0.43 eV، توزیع میدان به وضوح قوی‌تر شده است.

## ۴-۲- اثر تغییر پتانسیل شیمیایی بر توان عبوری موجبر

در این بخش تغییرات میزان عبور موجبر بر اثر افزایش پتانسیل شیمیایی در همان بازه مورد بحث، بررسی شده است. با مقایسه نمودار ۸ با نمودار ۹ به خوبی دیده می‌شود که همزمان با کاهش قسمت موهومی ضریب شکست گرافن، میزان عبور موجبر افزایش می‌یابد.




نمودار ۸) قسمت موهومی ضریب شکست گرافن در بازه مورد نظر (0.31-0.43 eV)




نمودار ۹) میزان عبور موجبر بر حسب پتانسیل شیمیایی

## ۳- نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گرافن یک گزینه مناسب جهت مدارات مجتمع نوری است. به طور مثال در همین ساختار که طول آن ۵ میکرومتر بوده است، اختلاف بین دو حالت عبور حدود 6 dB بوده است. بنابراین گرافن یک گزینه مناسب جهت استفاده در مدولاتورها یا سوییچ‌های الکترواپتیکی است.

## ۴- مراجع

[1] Garmire, Elsa, et al. *Integrated optics*. Ed. T. Tamir. Vol. 7. Springer Science & Business Media, 2013
[2] Maier, Stefan Alexander. *Plasmonics: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
[3] Novoselov, K. S. A., et al. "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene." nature 438.7065 (2005): 197-200.
[4] Kim, Jonghwan, et al. "Electrical control of optical plasmon resonance with graphene." Nano letters 12.11 (2012): 5598-5602.
[5] Liu, Ming, et al. "A graphene-based broadband optical modulator." Nature474.7349 (2011): 64-67.



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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-14 ]