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

بررسی پدیده جایگزیدگی اندرسون در انتشار امواج پلاسمون سطحی بر پایه گرافن

میلاد ثانی[۱]، فاطمه صفرزاده[۱] ، محمود حسینی فرزاد[۱] و علی هاتف[۲]

[۱] بخش فیزیک دانشگاه شیراز، پردیس ارم دانشگاه، میدان ارم، شیراز

[۲]آزمایشگاه فیزیک محاسباتی نیپیسینگ، بخش علوم کامپیوتر و ریاضی، دانشگاه نیپیسینگ، کانادا

چکیده – گرافن ساختاری دو بعدی با خواصی منحصر به فرد است. تحرک بالای حامل ها در گرافن باعث می شود که پلاسمون های گرافن اتلاف کم و محدودیت به سطح قابل ملاحظه ای داشته باشند. این امر گرافن را برای کاربردهای پلاسمونیک مناسب می کند. در این مقاله ساختاری متشکل از توری سیلیکونی و گرافن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که با ایجاد بی نظمی در ساختار پیشنهادی می توان مودهای پلاسمونی جدیدی ایجاد کرد که شدت قابل مقایسه ای نسبت به مودهـای سـاختار مـنظم دارند. این امر چنین ساختاری را کاندید مناسبی برای رزوناتورها و به طور کلی وسایل اپتوالکترونیکی می کند.

کلید واژه- تک لایه گرافن، پلاسمون سطحی، جایگزیدگی اندرسون

Investigation of Anderson localization phenomena in propagation of surface plasmon waves in graphene surface

Milad Sani[1], Fatemeh safarzadeh[1], Mahmood Hosseini Farzad[1] and Ali Hatef[2]

[1]Department of physics, University of shiraz, Shiraz, Iran

[2]Nipissing Computational physics laboratory (NCPL), Department of computer science and mathematics, nipissing university-north bay, canada

Abstract- graphene is a 2d structure with unique properties. High carrier mobility in graphene causes to graphene plasmons have low loss and considerable confinement to the surface. This suites graphene for plasmonic applications. In this article a structure consists of silicon grating and graphene were investigated. Results showing that with creating disorder in the proposed structure, we can create new localized plasmon modes that have comparable intensity than ordered structure modes. This makes such a structure as a suitable candidate for resonators and in general optoelectronic devices.

Keywords: Anderson localization, Graphene monolayer, Surface plasmon

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

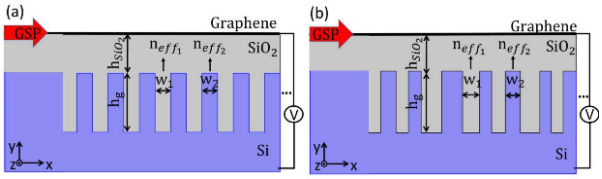
مقدمه

گرافن تک لایه ای دوبعدی از اتم‌های کربن است که با ویژگی‌های منحصر به فردی که از خود نشان می‌دهد افق‌های جدیدی برای طراحی نانوساختارهای پلاسمونیک باز می‌کند [۱]. پلاسمون‌های سطحی گرافن می‌توانند در محدوده‌ی طیفی فروسرخ نزدیک تا تراهرتز تحریک شوند. تحرک بالای حامل‌ها در گرافن موجب می‌شود که، پلاسمون‌های گرافن اتلاف کمی داشته باشند و شدیداً محدود به سطح باشند. به علاوه میزان تحرک حامل‌ها در گرافن توسط دوپ شیمیایی و اعمال ولتاژ قابل کنترل است. این خواص گرافن را کاندید مناسبی برای کاربرد در ساختارهایی نظیر مدارهای فوتونیک [۲], سنسورها [۳] و ... می‌کند. محققان علاقه زیادی به مشاهده و مطالعه پدیده جایگزیدگی اندرسون امواج پلاسمون سطحی دارند و پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده است [۴-۶]. تداخل پراکندگی‌های چندگانه امواج پلاسمون سطحی در محیط‌های نامنظم می‌تواند منجر به رخداد پدیده جایگزیدگی اندرسون شود[۷]. گرافن به دلیل اتلاف کمتر پلاسمون‌های سطحی، محیط مناسب‌تری را برای رخداد جایگزیدگی اندرسون فراهم می‌آورد. اخیراً جایگزیدگی اندرسون پلاسمون‌های گرافن را در توری سیلیکونی نامنظم بر پایه‌ی گرافن نشان داده‌ایم [۸].

در این مقاله، ساختاری متشکل از یک لایه گرافن قرار گرفته بر روی توری سیلیکونی، به منظور بررسی رفتار پلاسمون‌ها در حضور بی نظمی شبیه سازی شده است. در ادامه تأثیر ایجاد بی نظمی با درجات مختلف بر مودهای پلاسمونی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

تئوری و ساختار شبیه‌سازی شده

در این مقاله با هدف بررسی اثر ایجاد بی‌نظمی بر رفتار پلاسمون‌ها، ساختاری به فرم شکل ۱ شبیه‌سازی شده است. این ساختار از یک تک‌لایه گرافن قرار گرفته بر روی یک توری سیلیکونی تشکیل شده است.



شکل ۱: تصویری شماتیک از نانوساختار توری-گرافن. a توری پریودیک. b توری رندم با درجه بی نظمی ۲۰٪.

در ساختار پریودیک w_1 و w_2 که اندازه پهنا و فاصله میان دندانه‌هاست، ۵۰ نانومتر است. فضای میان گرافن و توری از ماده SiO2 پر شده است. h_{SiO2} و h_g به ترتیب فاصله میان سطح توری تا لایه گرافن و ارتفاع دندانه توری است و هردو برابر با ۱۵۰ نانومتر درنظر گرفته شده اند.

پلاسمون‌ها از سمت چپ ساختار تحریک می‌شوند. ساختار توری، موجب مدوله شدن رسانندگی گرافن و ضریب شکست مؤثر حرکت پلاسمون‌ها می‌گردد. برای بررسی خواص اپتیکی گرافن از رابطه‌ی کوبو[1] مربوط به رسانندگی اپتیکی برای انتقال درون باندی و بین باندی استفاده می‌شود که ترم درون باندی (ترم اول) به دلیل کوچک بودن قابل صرف نظر است [۹]:

$$\sigma_g(\omega)=\frac{ie^2k_BT}{\pi\hbar^2(\omega+i\tau^{-1})}\left[\frac{\mu_c}{k_BT}+2\ln\left[\exp\left(-\frac{\mu_c}{k_BT}\right)+1\right]\right]+\frac{ie^2}{4\pi\hbar}\ln\left[\frac{2|\mu_c|-\hbar(\omega+i\tau^{-1})}{2|\mu_c|+\hbar(\omega+i\tau^{-1})}\right] \quad (۱)$$

در رابطه ۱، e بار الکترون، ω فرکانس فوتون در خلأ، $T=300K$ دما، τ زمان واهلش تکانه و μ_c پتانسیل شیمیایی است که از رابطه $\mu_c=\hbar v_f(\pi n)^{1/2}$ به دست می آید که n چگالی دوپینگ گرافن و v_f سرعت فرمی است. همچنین $\tau=\mu\mu_c/(ev_f)^2$. $\mu=20000cm^2v^{-1}s^{-1}$ تحرک حامل و $n=\varepsilon_d\varepsilon_0V/eH$ که ε_d و ε_0 به ترتیب گذردهی نسبی SiO2 و فضای آزاد هستند.

[1] kubo

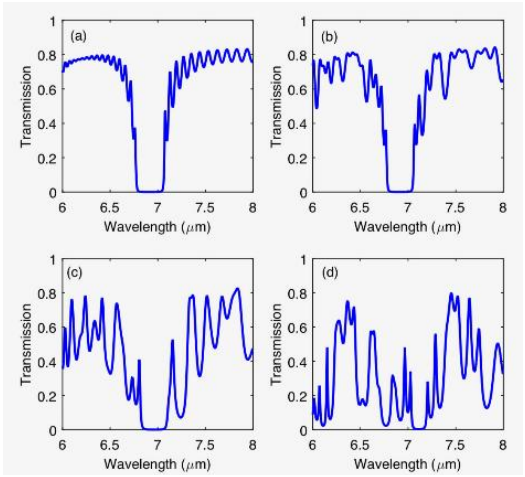
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

$V=80v$ ولتاژ اعمال شده و H فاصله توری تا سطح گرافن است.

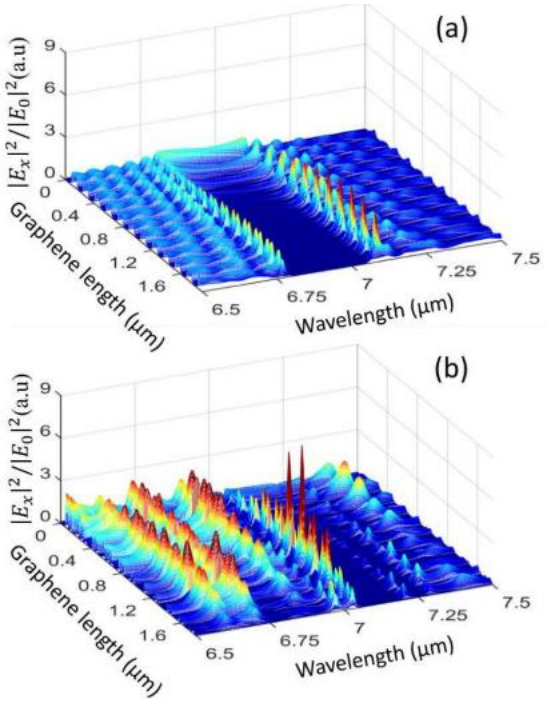
بحث و نتایج

برای رخداد پدیده‌ی جایگزیدگی اندرسون برای حرکت پلاسمون‌های سطحی، پهنای دندانه‌های توری را به صورت رندم انتخاب می‌کنیم (شکل ۱ سمت راست). در اینجا طیف عبور را مورد محاسبه قرار داده‌ایم. نمودار عبور برای یک ساختار منظم با توری پریودیک و سه ساختار با توری رندم با درجات بی نظمی ۵٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: طیف عبور گرافن بر پایه توری سیلیکونی براگ برای توری پریودیک (a) و توری های رندم با درجات بی نظمی ۵٪ (b)، ۱۵٪ (c)و ۲۵٪ (d).

شکل ۲ نشان می‌دهد که در نواحی ممنوعه مربوط به ساختار پریودیک مودهای پلاسمونیکی رندم ایجاد می‌شوند. به علاوه باندهای ممنوعه نازک جدیدی در نواحی عبوری ساختار منظم به وجود می‌آیند. برای درک علت فیزیکی این رفتار، باید ماهیت تداخل امواج پلاسمونی را مورد توجه قرار داد. امواج پلاسمونی گرافن ضمن انتشار، تغییرات پریودیک و یا نامنظم توری را در قالب تغییر ضریب شکست مؤثر حس می‌کنند که این امر منجر به بازتاب‌های متعدد امواج پلاسمونی می‌گردد. برای طول‌موج‌های باند عبوری تداخل سازنده و برای طول موج‌های باند ممنوعه تداخل ویرانگر رخ داده است. شکل ۳، توزیع شدت میدان الکتریکی نرمالایز شده را به عنوان تابعی از طول موج و مکان روی سطح گرافن نشان می‌دهد که یکی از آن‌ها مربوط به ساختار پریودیک و دیگری مربوط به ساختار بی‌نظم با درجه‌ی بی نظمی ۲۵٪ است.



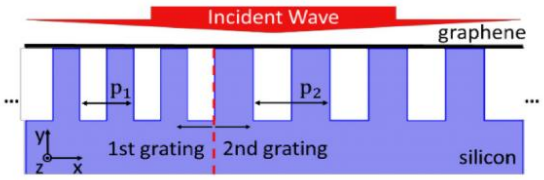
شکل ۳: توزیع شدت میدان الکتریکی به عنوان تابعی از طول موج و موقعیت برای یک ساختار پریودیک (a) و یک ساختار رندم با درجه بی نظمی ۲۵ ٪ (b).

این شکل به وضوح ایجاد مودهای پلاسمونی در مناطق ممنوعه را نشان می دهد. همچنین می‌توان جایگزیده شدن مودهای پلاسمونی در طول ساختار را نیز مشاهده کرد. نکته‌ی قابل توجه شکل این است که به دلیل رخداد پدیده‌ی جایگزیدگی اندرسون شدت مود می‌تواند به اندازه‌ی فاکتور ۹ نسبت به مودهای پلاسمونیک ساختار پریودیک افزایش یابد. چنین ساختاری می‌تواند به عنوان رزوناتوری با فاکتور کیفیت بالا مورد استفاده قرار گیرد. به علاوه این که مودهای پلاسمونی چنین ساختاری با تغییر ولتاژ اعمال شده میان گرافن و توری به طور دقیق قابل کنترل هستند. این مودهای پلاسمونی بسیار جایگزیده که قابل کنترل نیز هستند، افق‌های جدیدی برای پیشرفت وسایل اپتوالکترونیکی همچون فیلترهای فوتونیک، سنسورهای پلاسمونیک و مدولاتورهای فضایی نوری باز می‌کنند.

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

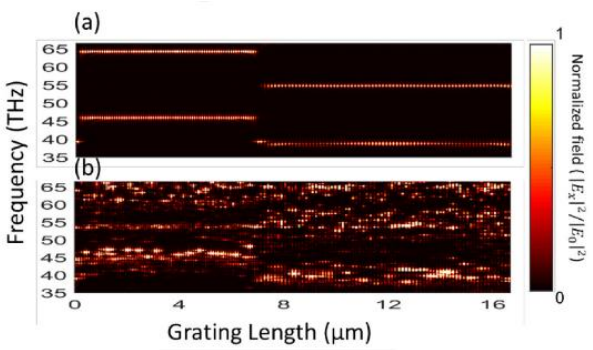
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

در ساختار دیگری دو توری به هم چسبیده را شبیه سازی کردیم که از بالا مورد تابش قرار می‌گیرد که p1=35 و p2=50 به ترتیب پریود توری اول و پریود توری دوم هستند (شکل ۴).



شکل ۴: نانوساختار با دو توری به هم چسبیده.

سپس در ساختار دو توری با تغییر پهنای دندانه‌ها بی‌نظمی ایجاد شده است. شکل ۵ توزیع شدت میدان الکتریکی روی سطح گرافن را در دو ساختار پریودیک (شکل ۵a) و بی‌نظم (شکل ۵b) نشان می‌دهد.



شکل ۵: توزیع شدت میدان الکتریکی برای ساختار دو توری به هم چسبیده به عنوان تابعی از فرکانس و طول در دو حالت پریودیک (a) و رندم (b).

همانگونه که از شکل ۵ استنباط می‌شود برای ساختار پریودیک، پلاسمون‌ها در دو فرکانس ۴۵,۸ و ۶۴,۱ تراهرتز مربوط به توری اول و دو فرکانس ۳۸,۷ و ۵۴,۸ تراهرتز مربوط به توری دوم تحریک می‌شوند. اما پس از ایجاد بی‌نظمی در ساختار دو توری، پلاسمون‌های جایگزیده تقریباً در تمام فرکانس‌ها از ۳۷ تا ۶۶ تراهرتز با شدت یک مرتبه بزرگی، بزرگ‌تر از پلاسمون های توری پریودیک، تحریک می‌شوند. اگر تعداد توری‌ها افزایش یابد، طیف فرکانسی پلاسمون‌های تحریک شده پهن‌تر می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ساختاری بر پایه گرافن را پیشنهاد دادیم و به بررسی ایجاد بی نظمی بر حرکت پلاسمون ها در این ساختار پرداختیم. نتایج نشان دادند که با ایجاد بی نظمی می توان مودهای پلاسمونی را در مناطق طیفی ممنوعه مربوط به ساختار پریودیک ایجاد کرد؛ که این مودها علاوه بر قابل کنترل بودن، شدت قابل ملاحظه‌ای نسبت به مودهای پلاسمونی ساختار پریودیک دارند. بنابراین پدیده‌ی جایگزیدگی اندرسون در حرکت پلاسمون‌ها می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بازدهی ساختارهای پلاسمونیک بر پایه‌ی گرافن را افزایش دهد. این ساختار پیشنهادی می تواند کاندید مناسبی برای استفاده در رزوناتورها و سایر ادوات پلاسمونیکی بر پایه گرافن از جمله فیلترها، سنسورها و مدولاتورها باشد.

مرجع‌ها

[1] Cox J. D., Yu R. and Garc´ıa de Abajo F. J., Phys. Rev. B, 96 ,045442(2017).

[2] Kim J. and Choi S., Opt. Express, 19 ,24557, (2011).

[3] Yu R., Cox J. D. and Garc´ıa de Abajo F. J., Phys. Rev. Lett., 117 ,123904 (2016).

[4] Grsillon. S, et al, Phys. Rev. Lett. 82 (22), pp.45204523 (1999).

[5] Bozhevolnyi. S. I, Volkov. V. S. Leosson. K, phys. Rev. Lett. 89 (18), p.186801 (2002).

[6] Rting. F, Phys. Rev. B, 83, 115447 (2011).

[7] Sanchez-Gil J. A., Freilikher V., Yurkevich I. and Maradudin A. A., Phys. Rev. Lett., 80 ,948(1998).

[8] Sani M. and Hosseini Farzad M., Phys. Rev. B, 97 ,85406(2018).

[9] Falkovsky. L.A. and Pershoguba. S. S, Phys. Rev. B 76, 153410 (2007).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

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