بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

تنظیم مدهای پلاسمونی نانوحفره‌های گرافنی بایاس شده به صورت گسسته: کاربرد در انبرک‌های نوری

مسعود رهنمافر و مصطفی قربان‌زاده

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

m.rahnamafar@sun.hsu.ac.ir و m.ghorbanzadeh@hsu.ac.ir

چکیده – در این مقاله به برر سی امکان کنترل مدهای پلا سمونی تحریک شده در یک آرایه خطی از نانوحفره‌های ایجاد شده در صفحه گرافن دوبعدی می‌پردازیم. شدت میدان الکتریکی در لبه نانوحفره‌ها در پتانسیل‌های شیمیایی مختلف نا شی از اعمال موج صفحه‌ای محا سبه شده ا ست. ن شان داده‌ایم با تغییر پتانسیل شیمیایی یک انتقال در مقدار و مکان پیک میدان در طول موج و پتانسیل شیمیایی بهینه ۷/۲ میکرومتر و ۰/۶ الکترون-ولت رخ می‌دهد. تو سعه این ساختار می‌تواند منجر به ارائه افزاره‌ای جهت تشـــخیص و تله‌اندازی نانوذرات در لبه نانوحفره‌های گرافن به شـــکل کنترل شـــده گردد. تشـــخیص و تله‌اندازی نانوذرات بوســـیله میدان‌های نزدیک پلاسمونی در بیولوژیک و آزمایشگاه روی تراشه کاربرد وسیعی دارد.

کلید واژه – انبرک نوری، پلاسمون سطحی، گرافن، نانوحفره، نیروی اپتیکی

Tuning the Plasmonic Modes of Discretely Biased Graphene Nanoholes: Application to Optical Tweezers

Masoud Rahnamafar and Mostafa Ghorbanzadeh

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, P.O. Box ۳۹۷, Sabzevar ۹۶۱۷۹۷۶۴۸۷, Iran

m.rahnamafar@sun.hsu.ac.ir, m.ghorbanzadeh@hsu.ac.ir

Abstract- In this paper we investigate the possibility of controlling excited plasmonic modes in a linear array of nanoholes formed in a ۲D graphene sheet. The intensity of the electric field at the edges of the nanoholes at different chemical potentials by applying a plane wave has been calculated. We have shown that a shift in the intensity and the position of the plasmonic modes occur at the optimum wavelength and chemical potential of ۷٫۲ μm and ۰٫۶ eV. The development of this structure could realize a device for the detection and trapping of nanoparticles at the edges of graphene nanoholes in a controlled manner.

Keyword: Graphene, Nano-hole, Optical Force, Optical Tweezer, Surface Plasmon

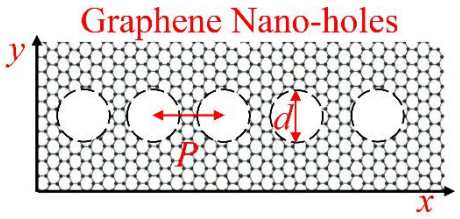
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

مقدمه

انبرک‌های نوری که اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی توسط آرتور اشکین معرفی شد [۱] بستر مناسبی را برای تله‌اندازی نانوذرات بر اساس برهم‌کنش نور و ماده محیا ساخته است. طی سال‌های اخیر مطالعات بسیاری [۲-۳] در این حوزه صورت گرفته که باعث شده تله‌اندازی نانوذرات با دقت بالاتری نسبت به نمونه‌های قبلی انجام شود. انبرک‌های نوری پلاسمونی در حوزه میدان‌های نزدیک مورد استفاده قرار می‌گیرند و به دلیل مکانیزم ویژه‌ای که دارند می‌توان از آن‌ها برای تله‌اندازی نانوذرات با ابعاد کمتر از طول موج و حتی ویروس ها [۴] استفاده کرد. این انبرک‌ها علاوه برایجاد گرادیان میدان و نیروی قوی در مکان مورد نظر، می توانند اثرات مخرب دمایی بسیار کمتری نسبت به لیزرهای متمرکز ایجاد کنند که این مزیت باعث عدم صدمه به نمونه های زیستی می‌گردد [۳]. براثر برهم‌کنش نور و الکترون، پلاسمون‌های سطحی در فصل مشترک فلز و دی الکتریک ایجاد می‌شوند و گرادیان میدان قوی در سطح و لبه‌های فلز ایجاد می‌کند. میدان ایجاد شده با در نظر گرفتن قطبش منبع نور ورودی و نوع ساختار می‌تواند در جهت های خاصی قوی‌تر باشد [۵]. در سال ۲۰۱۶، [۲] از یک نانوحفره گرافن بدلیل ایجاد موبیلیتی الکترون بالاتر، میدان قوی تر و اثرات دمایی بسیار کمتر نسبت به طلا برای تله اندازی ذرات پلی استایرن استفاده شده است. در این مقاله با توجه به قابلیت تنظیم پروفایل مدهای پلاسمونی با تغییر سطح پتانسیل شیمیایی، از ایده مطرح شده در [۲] استفاده کرده و با طراحی یک آرایه خطی از نانوحفره‌های گرافن با انرژی پتانسیل شیمیایی متفاوت (قابل تنظیم توسط گیت) یک انبرک نوری پیشنهاد می دهیم که می تواند نانوذرات را به صورت کنترل شده جابجا نماید. در ادامه به بررسی ساختار و مدل ارائه شده می پردازیم.

ساختار و نحوه عملکرد

ساختار پیشنهادی مطابق مطالب ارائه شده در مقدمه، شامل یک صفحه گرافن دوبعدی تک لایه در صفحه xy می‌باشد که در آن آرایه‌ای از نانوحفره‌های پلاسمونی ایجاد شده است. قطر هر نانوحفره d برابر ۱۵۰ نانومتر بوده و فاصله نانوحفره‌ها از یکدیگر p برابر ۴۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. نانوحفره های منظم گرافن می تواند با بمباران یونی مشابه [۷] ایجاد شود.



شکل ۱: ساختار پیشنهاد شده از آرایه نانوحفره های گرافنی

روش شبیه‌سازی

بر اساس رابطه کوبو رسانایی گرافن با تخمین Random-Phase-Approximation در دمای پایین یعنی جایی که پتانسیل شیمیایی خیلی بیشتر از انرژی گرمایی باشد ($\mu_c \gg K_B T$) ، شامل هردو بخش interband و intraband می‌باشد. بنابراین رسانایی به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۷].

$$\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter} = \frac{2e^2 k_B T}{\pi\hbar^2}\frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}\ln\left[2\cosh\left(\frac{\mu_c}{2k_B T}\right)\right] + \frac{e^2}{4\hbar}\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\arctan\left(\frac{\hbar\omega - 2\mu_c}{2k_B T}\right) - \frac{i}{2\pi}\ln\frac{(\hbar\omega - 2\mu_c)^2}{(\hbar\omega - 2\mu_c)^2 + 4(k_B T)^2}\right] \quad (۱)$$

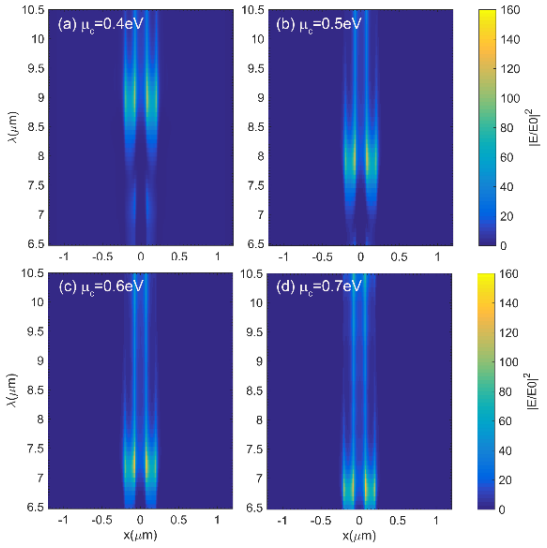
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

در این رابطه e بار الکترون، k_B ثابت بولتزمن، T دمای کاری، $\hbar$ ثابت پلانک کاسته شده، ω فرکانس زاویه‌ای نور ورودی، τ زمان استراحت حامل ها[۱] و μ_c پتانسیل شیمیایی می‌باشد.در محدوده مادون قرمز میانه از بخش interband می‌توان چشم‌پوشی کرد و به دلیل اصل طرد پاؤلی[۲] میتوان رسانایی سطحی را در گرافن با مدل شبه درود تخمین زد [۸]:

$$\sigma_g = \frac{e^2 \mu_c}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i\,\tau^{-1}} \qquad (۲)$$

در معادله بالا $\tau = (u\,\mu_c)/(ev_F{}^2)$ بوده و به موبیلیتی الکترون‌ها $\mu = 10000 cm^2/V.s$ وابسته است. مقدار سرعت فرمی v_F برابر با 10^6m/s می‌باشد.

در این مقاله شبیه‌سازی با روش حل عددی FDTD[۳] انجام می شود که روش مناسبی برای حل معادلات ماکسول در حوزه زمان می باشد. شرایط مرزی در اطراف ساختار PML[۴] بوده و منبع یک موج صفحه ای TEM است که با روش TFSF[۵] پیاده سازی شده است. با بکارگیری این منبع لیزر با توان ۴/۴ $mW/\mu m^2$ یک موج الکتریکی صفحه‌ای عمود بر صفحات گرافن با قطبش در جهت محور x به ساختار تابیده می شود. طول موج این نور در حوزه مادون قرمز میانه در بازه ۶/۵ تا ۱۰/۵ میکرومتر است [۵].از طرفی پتانسیل شیمیایی هر صفحه گرافنی از طریق یک گیت مستقل قابل کنترل است. بدین صورت که اعمال ولتاژ به گیت باعث افزایش چگالی بار در گرافن شده و ضمن اینکه چگالی بار با پتانسیل شیمیایی در گرافن رابطه مستقیم



شکل۲: میدان الکتریکی نرمال شده مربوط به حفره مرکزی در طول موج ۶/۵ تا ۱۰/۵ میکرومتر برحسب مکان x و پتانسیل‌های شیمیایی ۰/۴ تا ۰/۷ الکترون-ولت

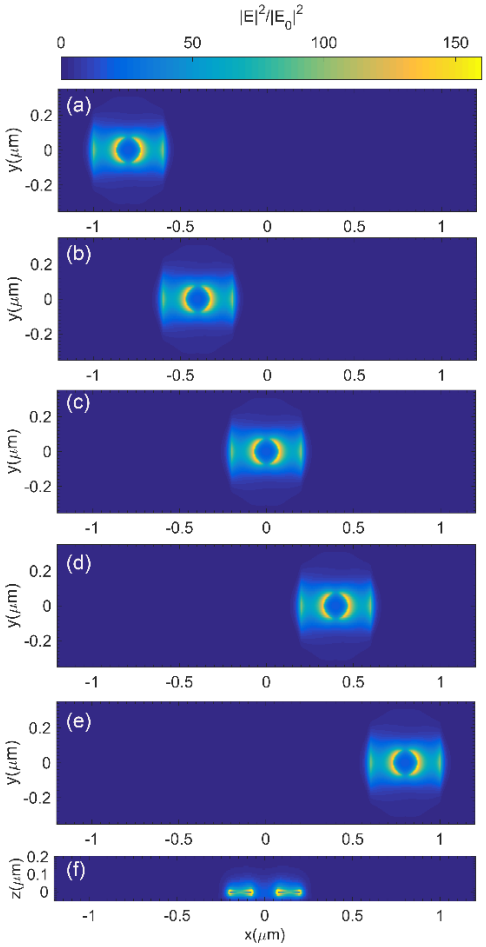
دارد، اینگونه میتوان پتانسیل شیمیایی را در گرافن از طریق گیت خارجی کنترل کرد [۳].

نتایج و مباحثه

با اعمال لیزر در طول موج ۷/۲ میکرومتر تحریک بهتری در پلاسمون های جایگزیده شده صورت گرفته و بسته به مقدار سطح پتانسیل شیمیایی گرافن، یک میدان الکتریکی قدرتمند اطراف نانوحفره بوجود می آید. برای بررسی مقدار ماکزیمم میدان ایجاد شده در لبه نانوحفره بایستی مقدار آن را در طول موج‌های متفاوت محاسبه کرد تا بهترین طول موج جهت تله‌اندازی نانو ذره بدست آید. شکل(۲) مقادیر میدان الکتریکی نرمال شده را در راستای محور x در بازه طول موج ۶/۵ تا ۱۰/۵ میکرومتر، در پتانسیل‌های شیمیایی ۰/۴ تا ۰/۷ الکترون-ولت برای حفره مرکزی (حالت روشن) و۰/۰۵ الکترون-ولت برای سایر حفره ها (حالت خاموش)

[۱] Carrier Relaxation Time
[۲] Pauli Exclusion Principle
[۳] Finite Difference Time Domain
[۴] Perfectly Match Layer
[۵] Total Field Scatter Field

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]



شکل۳: میدان الکتریکی نرمال شده. a-e سویچینگ مدهای روشن با پتانسیل شیمیایی ۰/۶ الکترون-ولت و خاموش با پتانسیل شیمیایی ۰/۰۵ الکترون-ولت در یک آرایه از نانوحفره های گرافن در صفحه *xy* که به اندازه ۱۰ نانومتر بالاتر از گرافن، قرار گرفته است. c-نمای جانبی روشن شدن حفره مرکزی در صفحه *xz* و در *y*=۰

نمایش می‌دهد. پتانسیل شیمیایی ۰/۷ الکترون-ولت با فرض استفاده از اکسید SiO_2 با ضخامت ۱۰ نانومتر و تقریب خازن با صفحات موازی[۳] برابر ۱۶ ولت می باشد که منجر به شکست اکسید نمی شود لازم به ذکر است با اعمال ناخالصی شیمیایی این ولتاژ می تواند به مقدار کمتری نیز کاهش یابد. با بررسی شکل می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر پتانسیل شیمیایی، یک انتقال در مقادیر رزونانس میدان بوجود می‌آید. همانطور که در شکل(۲) مشاهده میشود در پتانسیل شیمیایی ۰/۶ الکترون-ولت در طول موج ۷/۲ میکرومتر مقادیر میدان قوی‌تر بوده و محاسبات بعدی در همین طول موج و پتانسیل شیمیایی انجام خواهد شد.

شکل (۳-) توزیع میدان نرمال شده و نحوه روشن و خاموش شدن هر کدام از حفره ها را در صفحه xy در مکان z=۱۰nm در طول موج ۷/۲ میکرومتر با پتانسیل شیمیایی ۰/۶ الکترون-ولت و شکل (۳-f) نمای جانبی روشن شدن حفره مرکزی در صفحه xz و در y=۰ را نمایش می‌دهد. این جابجایی می تواند در تله اندازی کنترل شده نانوذرات مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی میدان الکتریکی در یک آرایه از نانوحفره های گرافن پرداخته شد. نشان دادیم که با تنظیم پتانسیل شیمیایی بدون سویچ در طول موج لیزرمی توان مد پلاسمونی قوی ایجاد شده در لبه نانوحفره ها را تغییر داد. این پیک رزونانسی قوی میتواند در تله‌اندازی نانوذرات مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[۱] A. Ashkin, “Acceleration and trapping of particles by radiation pressure,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. ۲٤, no. ٤, pp. ۲٤–۲۷, ۱۹۷۰.

[۲] J.-D. Kim and Y.-G. Lee, “Graphene based plasmonic tweezers,” *Carbon N. Y.*, vol. ۱۰۳, pp. ۲۸۱–۲۹۰, ۲۰۱٦.

[۳] M. Samadi, et al, “Numerical investigation of tunable plasmonic tweezers based on graphene stripes,” *Sci. Rep.*, vol. ۷, no. ۱, pp. ۱–۹, ۲۰۱۷.

[٤] Khalil Mokri and et al “Polarization-dependent plasmonic nano-tweezer as a platform for on-chip trapping and manipulation of virus-like particles,” *IEEE Transactions on NanoBioscience, Early access*, ۲۰۲۱.

[٥] J. Zhang, et al, “Towards nano-optical tweezers with graphene plasmons: Numerical investigation of trapping ۱۰-nm particles with mid-infrared light,” *Sci. Rep.*, vol. ٦, no. December, pp. ۱–۷, ۲۰۱٦.

[٦] C. Cen *et al.*, “Plasmonic absorption characteristics based on dumbbell-shaped graphene metamaterial arrays,” *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, vol. ۱۰۳, no. March, pp. ۹۳–۹۸, ۲۰۱۸.

[۷] Alireza Safaei *et al.*, “Wide Angle Dynamically Tunable Enhanced Infrared Absorption on Large-Area Nanopatterned Graphene,” *ACS Nano*, vol. ۱۳, no. ۱, pp. ٤۲۱–٤۲۸, ۲۰۱۹.

[۸] C. Cen *et al.*, “A tunable plasmonic refractive index sensor with nanoring-strip graphene arrays,” *Sensors (Switzerland)*, vol. ۱۸, no. ۱۲, pp. ۱–۱۰, ۲۰۱۸.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]