



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۴۷۱-۱۰-A

جاذب پلاسمونیک مبتنی بر گرافن با کاربرد حسگری در باند فرکانسی فروسرخ دور

سامان حیدری، نجمه نزهت

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز

Sa.Heidari@sutech.ac.ir, nozhat@sutech.ac.ir

چکیده - در این مقاله، یک جاذب ایده آل پلاسمونیک تنظیم پذیر متشکل از دو حلقه گرافنی، لایه دی اکسید سیلیکون و زیرلایه طلا طراحی و شبیه سازی شده است. طیف جذب ساختار با تغییر پتانسیل شیمیایی و زمان استراحت گرافن، تغییر می کند. با انتخاب پتانسیل شیمیایی و زمان استراحت به ترتیب 1 eV و 1 ps ، یک قله جذب ایده آل در طول موج $19.26\ \mu\text{m}$ ، به دلیل افزایش پلاسمون-های سطحی گرافن مشاهده می شود. همچنین، تأثیر پارامترهای هندسی ساختار بر روی طیف جذب بررسی شده است. با تغییر ضریب شکست ماده تست قرار گرفته بر روی ساختار، جاذب پیشنهادی دارای حساسیت بالای 2323 nm/RIU است. با توجه به نتایج به دست آمده، جاذب پیشنهادی می تواند در کاربردهای دیگری مانند مدولاتورها و آشکارها نیز استفاده شود.

کلید واژه- پتانسیل شیمیایی، پلاسمون سطحی، جاذب، حسگر، گرافن

Graphene-Based Plasmonic Absorber with Sensing Application in the Far-infrared Region

Saman Heidari, Najmeh Nozhat

Department of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology

Sa.Heidari@sutech.ac.ir, nozhat@sutech.ac.ir

Abstract- In this paper, a tunable plasmonic perfect absorber composed of two concentric graphene rings, silicon dioxide layer and gold substrate is designed and simulated. The absorption spectrum of the structure changes by variation of chemical potential and relaxation time of graphene. A perfect absorption peak at the wavelength of $19.26\ \mu\text{m}$ is achieved with the chemical potential and relaxation time of 1 eV and 1 ps , respectively, which is due to increasing the surface plasmons of graphene. Also, the effect of geometrical parameters on the absorption characteristics is investigated. It is shown that by changing the refractive index of the test medium, the proposed absorber has the high sensitivity of 2323 nm/RIU . According to the obtained results, the proposed absorber can also be used in other applications such as modulators and detectors.

Keywords: Absorber, Chemical potential, Graphene, Sensor, Surface Plasmon.

مقدمه

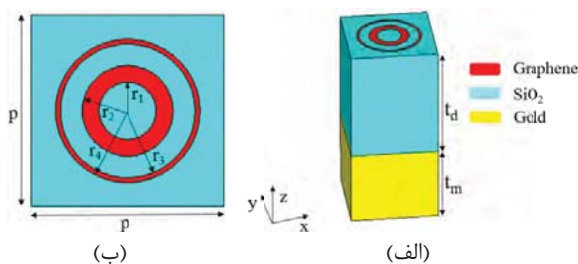
مبحث پلاسمونیک مبتنی بر برهم‌کنش بین امواج الکترومغناطیسی با الکترون‌های آزاد موجود در سطح فلز است و خواص نوری و انتشار امواج الکترومغناطیسی را در فصل مشترک بین فلز و عایق بررسی می‌کند [۱]. پلاسمون‌ها بر اساس مکان و نوع انتشار به سه دسته تقسیم می‌شوند که یکی از انواع آنها، پلاسمون سطحی^۱ است و در موادی که ضریب گذردهی الکتریکی آنها قسمت حقیقی منفی و موهومی کوچک مثبت دارند، تشکیل می‌شود [۱].

گرافن یک ساختار تک لایه از اتم‌های کربن است که در یک شبکه لانه زنبوری مرتب شده است، و از نظر رسانایی در دسته نیم‌رسانا قرار می‌گیرد [۲]. گرافن به دلیل تلفات کم، قابلیت انتشار SP، تحرک‌پذیری حامل‌های بار و قابلیت تنظیم رسانایی به‌وسیله تزریق شیمیایی یا میدان الکترومغناطیسی [۲] به ماده منحصربه‌فردی تبدیل شده است و می‌تواند در کاربردهای مختلفی مانند آشکارسازها [۳]، مدولاتورها [۴] و حسگرها [۵] مورد استفاده قرار گیرد. SP‌های مبتنی بر گرافن خواص منحصربه‌فردی نسبت به SP‌های فلز دارند، که یکی از مهمترین آنها تمرکز بالای SP به سطح گرافن است [۲].

در این مقاله، از گرافن برای طراحی یک جاذب پلاسمونیک تنظیم‌پذیر در ناحیه فرکانسی فروسرخ دور استفاده شده که یک جذب ایده‌آل در طول موج $19/26 \mu\text{m}$ به‌دست آمده است. همچنین، کاربرد حسگری جاذب پیشنهادی بررسی شده است. لازم به ذکر است که محدوده فرکانسی فروسرخ دور در طیف‌سنجی و تصویربرداری کاربرد دارد.

هندسه جاذب پلاسمونیک تنظیم‌پذیر

شکل (۱)، یک سلول واحد از ساختار جاذب پیشنهادی را نشان می‌دهد. جاذب متشکل از زیرلایه طلا است که بر روی آن لایه دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) قرار دارد. بر روی لایه SiO_2 ، دو حلقه گرافنی هم‌مرکز وجود دارد.



شکل ۱: نمای (الف) سه بعدی و (ب) دید از بالای یک سلول واحد جاذب پیشنهادی مبتنی بر گرافن. $r_1=60 \text{ nm}$ ، $r_2=95 \text{ nm}$ ، $r_3=140 \text{ nm}$ ، $r_4=150 \text{ nm}$ ، $t_d=1500 \text{ nm}$ ، $t_m=1000 \text{ nm}$ و $p=400 \text{ nm}$

ضخامت گرافن در این شبیه‌سازی 1 nm در نظر گرفته شده است. ضریب رسانندگی طلا $\sigma = 4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$ [۶] و ضریب گذردهی الکتریکی SiO_2 ، $3/9$ [۶] است. در محدوده فرکانسی فروسرخ دور، رسانایی گرافن را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۲]:

$$\sigma_g = \frac{e^2 \mu_c}{\pi \hbar^2} \frac{j}{\omega + j\tau^{-1}} \quad (1)$$

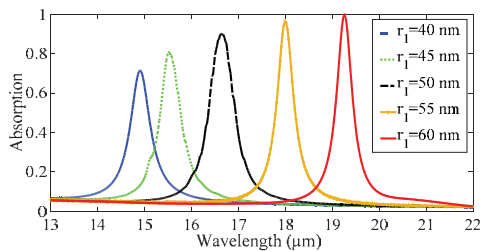
که e بار الکترون، μ_c پتانسیل شیمیایی گرافن، \hbar ثابت پلانک کاهش یافته، ω فرکانس زاویه‌ای و τ زمان استراحت است. در این مقاله، μ_c و τ به ترتیب 1 eV و 1 ps در نظر گرفته شده است.

نتایج شبیه‌سازی

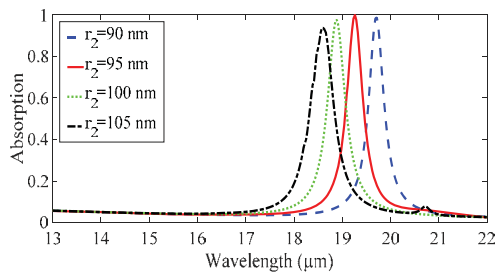
برای شبیه‌سازی ساختار، از روش المان محدود نرم‌افزار CST استفاده شده است. شرایط مرزی در راستای x و y به صورت متناوب و در راستای z به صورت باز در نظر گرفته شده است. یک موج صفحه‌ای با قطبش میدان الکتریکی x در جهت z- به ساختار تابیده می‌شود. میزان جذب ساختار با استفاده از رابطه $A=1-R-T$ به‌دست می‌آید، که R میزان

¹ Surface Plasmon (SP)

دلیل کاهش تزویج بین حلقه‌های گرافنی مجاور میزان جذب کاهش می‌یابد.

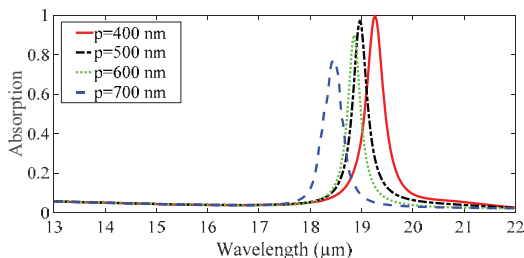


(الف)



(ب)

شکل ۴: طیف جذب ساختار به‌ازای تغییر شعاع‌های (الف) کوچک و (ب) بزرگ حلقه گرافن درونی

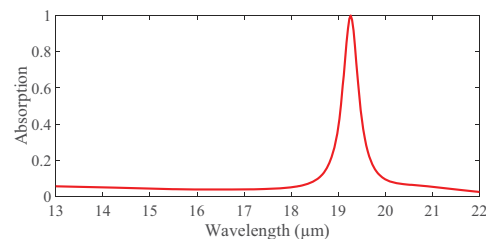


شکل ۵: طیف جذب ساختار به‌ازای تغییر دوره تناوب ساختار

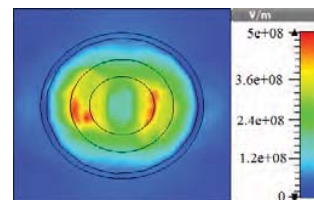
در شکل (۶) نتایج حاصل از تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن (μ_c) بر روی طیف جذب بررسی شده است. از آنجایی که با افزایش μ_c ، چگالی حامل‌ها بیشتر می‌شود، بنابراین میزان جذب افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش μ_c ، به دلیل کاهش ضریب شکست موثر ساختار، طول موج جذب کاهش می‌یابد، که از این ویژگی به‌عنوان قابلیت تنظیم‌پذیری ساختار یاد می‌شود. اثر تغییر زمان استراحت بر روی طیف جذب در شکل (۷) نشان داده شده است که

بازتاب و T میزان انتقال ساختار است. به دلیل اینکه ضخامت زیرلایه طلا بیشتر از عمق پوستی فلز در باند فرسوخ دور است، میزان انتقال صفر است.

طیف جذب ساختار در شکل (۲) رسم شده است، که یک قله جذب ایده‌آل در طول موج $19.26 \mu\text{m}$ مشاهده می‌شود. علت اصلی جذب، تقویت پلاسمون سطحی به دلیل وجود حلقه‌های گرافنی است. توزیع اندازه میدان الکتریکی ساختار در طول موج $19.26 \mu\text{m}$ در شکل (۳) رسم شده است. مشاهده می‌شود که جذب در این طول موج ناشی از حلقه درونی است، و تحریک SPها در سطح گرافن منجر به جذب کامل می‌شود. حلقه بیرونی باعث جذب در طول موج نزدیک $12 \mu\text{m}$ می‌شود که نسبت به جذب ناشی از حلقه درونی ناچیز است و دیده نمی‌شود.



شکل ۲: طیف جذب ساختار پیشنهادی

شکل ۳: توزیع اندازه میدان الکتریکی در طول موج $19.26 \mu\text{m}$

به‌منظور بررسی دقیق‌تر، تأثیر برخی از پارامترهای هندسی ساختار بر روی طیف جذب بررسی می‌شود. در شکل (۴) طیف جذب به‌ازای تغییر شعاع‌های کوچک و بزرگ حلقه گرافن درونی نشان داده شده، که بیشینه جذب به‌ازای $r_1 = 60 \text{ nm}$ و $r_2 = 95 \text{ nm}$ به‌دست آمده است. همچنین در شکل (۵) تأثیر دوره تناوب ساختار بر روی طیف جذب مشاهده می‌شود که با افزایش دوره تناوب، به-

تست از خود نشان می‌دهد. چنانچه اختلاف ضریب شکست کمتر از ۵٪ باشد، تغییرات برای حسگر قابل تشخیص است ولی میزان حساسیت کم است. برای ضریب شکست ۵٪، حساسیت برابر 1180 nm/RIU است. بنابراین، برای داشتن حساسیت بالا، باید ضریب شکست محیط تست بیشتر از ۵٪ باشد.

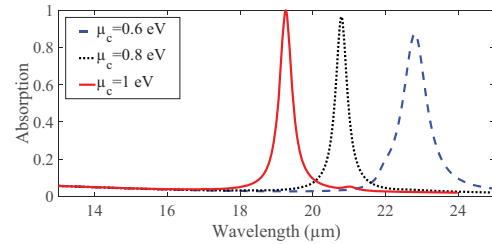
نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک جاذب پلاسمونیک مبتنی بر گرافن در باند فرورسرخ دور طراحی و بررسی شد. جذب ساختار عمدتاً به دلیل وجود حلقه گرافنی و تحریک SPها در سطح گرافن است، که منجر به ایجاد یک قله جذب ایده‌آل در طول موج $19/26 \mu\text{m}$ شد. ساختار پیشنهادی تنظیم-پذیر است و با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن، بدون تغییر ابعاد به راحتی می‌توان طول موج جذب را تغییر داد. همچنین کاربرد حسگری جاذب پیشنهادی بررسی شد و حساسیت بالای 2323 nm/RIU به دست آمد.

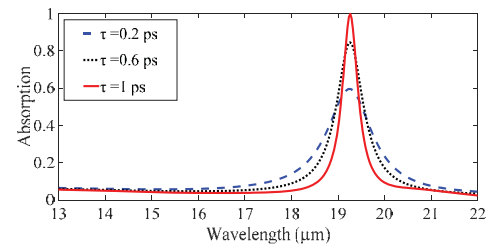
مرجع‌ها

- [1] S. A. Maier, *Plasmonics: Fundamental and Applications*, Springer, 2007.
- [2] M. Nejat and N. Nozhat, "Sensing and switching capabilities of a graphene-based perfect dual-band metamaterial absorber with analytical methods," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 37, pp.1359-1366, 2020.
- [3] J. Warbinek, D. Leimbach, D. Lu, et al., "A graphene-based neutral particle detector," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 114, pp. 061902-1-4, 2019.
- [4] J. Chi, H. Liu, N. Huang, and Z. Wang, "A broadband enhanced plasmonic modulator based on double-layer graphene at mid-infrared wavelength," *J. Phys. D*, Vol. 52, pp. 1-15, 2019.
- [5] H. Huang, S. Su, N. Wu, et al., "Graphene-based sensors for human health monitoring," *Front. Chem.*, Vol. 7, pp. 1-26, 2019.
- [6] Z. Yi, C. Liang, X. Chen, et al., "Dual-band plasmonic perfect absorber based on graphene metamaterials for refractive index sensing application," *Micromachines*, Vol. 10, pp. 443-1-11, 2019.

با افزایش τ به دلیل افزایش بارها در سطح گرافن میزان جذب بیشتر می‌شود.

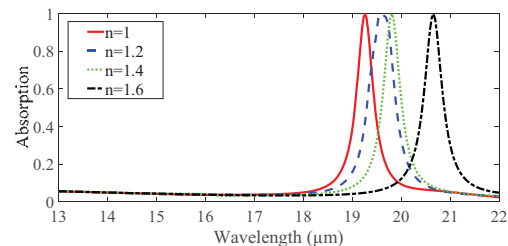


شکل ۶: طیف جذب به ازای تغییر پتانسیل شیمیایی (μ_c)



شکل ۷: طیف جذب به ازای تغییر زمان استراحت (τ)

به منظور بررسی خاصیت حسگری ساختار، یک ماده تست با ارتفاع 17 nm بر روی ساختار قرار داده شده و تغییرات در طول موج جذب زمانی که ضریب شکست از 1 تا $1/6$ تغییر می‌کند، در شکل (۸) رسم شده است. حساسیت ساختار به صورت $S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}$ تعریف می‌شود که $\Delta\lambda$ و Δn به ترتیب تغییرات طول موج تشدید و ضریب شکست ماده تست هستند [۲].



شکل ۸: طیف جذب ساختار به ازای تغییر ضریب شکست ماده تست با تغییر ضریب شکست از 1 به $1/2$ ، $1/4$ و $1/6$ به ترتیب مقدار حساسیت برابر با 1940 nm/RIU ، 1345 nm/RIU و 2323 nm/RIU است. بنابراین، جاذب پیشنهادی حساسیت بالایی در اندازه‌گیری میزان ضریب شکست ماده