



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



شفافیت القایی پلاسمونیک کنترلی پذیر و خاصیت حسگری در یک ساختار گرافنی

ثنا غفاری^۱، محمدرضا فروزش فرد^۱ و زهره وفاپور^۲

۱- دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه جان هاپکینز، مریلند، آمریکا

چکیده - شفافیت القایی پلاسمونیک در یک ساختار گرافنی متشکل از یک آنتن H شکل و یک زوج میله (II) که از درون لایه گرافن بیرون آورده شده‌اند، بررسی شده است. لازمه تولید PIT در نانو ساختار پیشنهادی شکست تقارن می‌باشد به اینگونه که میدان نزدیک حاصل از مد روشن با مد تاریک جفت می‌شوند و از این جفت شدگی اثر PIT در محدوده فرکانسی مد روشن حاصل می‌شود. با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن محدوده شفافیت در ساختار کنترل خواهد شد. کاربرد ساختار برای حسگر ضریب شکست نیز بررسی شده و مقدار حساسیت $1055 \frac{nm}{RIU}$ برای آب به دست آمد.

کلیدواژه- شفافیت القایی پلاسمونیک، حسگر ضریب شکست، گرافن.

Tunable plasmonic induced transparency and sensor properties in a graphene structure

Ghafari Sana^{1*}, Forouzesfard Mohammadreza¹, and VafapourZohreh²

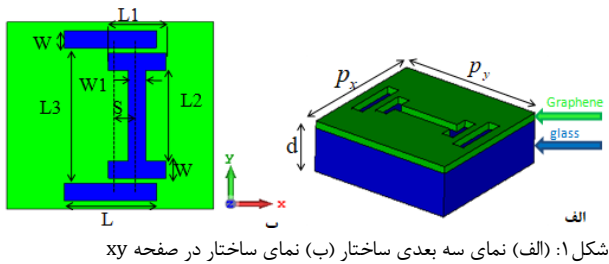
1- Department of Physics, Faculty of Science, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran

2-Department of Electrical and Computer Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218, USA

*sana.ghaffari@stu.vru.ac.ir

Abstract- plasmonic induced transparency in a graphene structure composed of cut-out H-shape as well as two parallel pair antennas in a graphene layer is investigated. It is shown that breaking symmetry is a necessary condition to have PIT effect in the structure. In this situation, the dark mode antenna coupled with the near field of the bright mode and the PIT effect is created. The PIT frequency can be tuned with changing chemical potential of the graphene. Application of the structure as a refractive index sensor is also analyzed and the value of $1055 \frac{nm}{RIU}$ is obtained for water sensitivity.

Keywords: plasmonic induced transparency, refractive index sensor, graphene.



شکل ۱: (الف) نمای سه بعدی ساختار (ب) نمای ساختار در صفحه xy

مقدمه

پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی^۱ (EIT) حذف جذب از راه تداخل کوانتومی در یک اتم است [1]. این پدیده همیشه بصورت یک شفافیت باریک در طیف جذب دیده می‌شود، که کاربردهای حسگری بسیار مفیدی دارد. امروزه این پدیده در سیستم‌های کلاسیکی نیز مشاهده شده و مورد توجه زیادی قرار گرفته است (PIT)^۲ [2]. این پدیده در حالت کلاسیکی، با تغییر هندسه سیستم و تغییر قطبش نور به راحتی قابل کنترل است و برای تولید آن احتیاجی به دو لیزر مختلف نیست. بررسی شفافیت القایی در سیستم‌های کلاسیکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های سال‌های اخیر می‌باشد [۳-۵].

امروزه گرافن به دلیل خصوصیات منحصر بفرد و قابلیت کنترل پذیری زیاد، علاقه‌های بسیاری را به سمت خود جلب کرده است. وجود یک الکترون آزاد و خواصی مانند شفافیت نوری، انعطاف‌پذیری، پویایی بالای الکترون و برخی ویژگی‌های دیگر گرافن را به ماده‌ای بی‌نظیر تبدیل کرده است.

در این مقاله با استفاده از یک لایه بسیار نازک گرافن پدیده EIT در یک ساختار H-II مشاهده می‌شود و با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن کنترل پذیری فرکانس شفافیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان همچنین با توجه به حساسیت فرکانس شفافیت نسبت به ضریب شکست آنتن‌ها، خاصیت حسگری و میزان حساسیت آن بررسی می‌شود.

طراحی ساختار و نتایج

جدول ۱: مشخصات هندسی ساختار پیشنهاد شده.

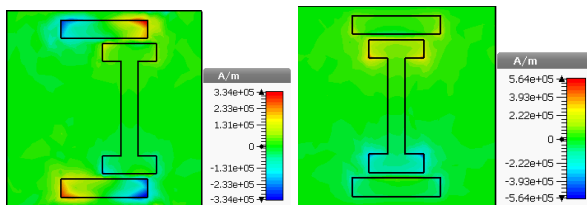
پارامتر	ابعاد (nm)
W	50
w ₁	46
L	240
L ₁	150
L ₂	260
L ₃	390

شکل ۱ نمای ساختار پیشنهاد شده را نشان می‌دهد. زیرلایه شیشه دارای ضخامت $p_x = p_y = d = 100 \text{ nm}$ و 540، ضریب شکست آن در محدوده فرکانسی مورد مطالعه به طور تقریبی 1.5 در نظر گرفته شده است. بر روی این زیرلایه، تک لایه گرافن با ضخامت یک نانومتر قرار دارد که آنتن‌هایی شامل یک آنتن روشن H شکل و یک آنتن تاریک متشکل از یک جفت میله موازی با یکدیگر (II) از درون لایه گرافن بیرون آورده شده‌اند و به اختصار H-II نامیده می‌شود. آنتن‌ها از جنس طلا هستند و مشخصات هندسی ساختار پیشنهاد شده در جدول ۱ آورده شده است. برای شبیه‌سازی‌های این ساختار از نرم‌افزار CST Microwave Studi استفاده کرده‌ایم. این نرم افزار بر پایه روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) طراحی شده است. در این شبیه سازی از شرط مرزی سلول واحد استفاده می‌کنیم و قطبش نور در راستای محور xها انتخاب شده است. جهت انتشار نور و قرار گرفتن پورت‌ها در راستای z است.

^۱ Plasmonically Induced Transparency

^۱ Electromagnetic Induced Transparency

دوم ایجاد و شروع به تقویت می کند که نشان دهنده پدیده PIT می باشد. مشاهده رزونانس دوم در طیف عبور ساختار در حالت نامتقارن نتیجه برهمکنش آنتن تاریک با میدان های نزدیک ناشی از آنتن دوقطبی است. با توجه به نمودارها در کهای مختلف، بهینه ترین حالت شکست تقارن $S = 70 \text{ nm}$ است و PIT در محدوده فرکانسی (12.67 THz) قابل مشاهده است. در ساختار متقارن $(S = 0 \text{ nm})$ با وجودی که آنتن تاریک با تابش های میدان نزدیک آنتن دوقطبی برهمکنش دارد، اما میدان های چهارقطبی ایجاد شده در دو طرف آنتن روشن دارای شدت مساوی با یکدیگر و در خلاف جهت هم هستند و بنابراین اثر یکدیگر را خنثی می کنند و در نتیجه در حالت متقارن اثر PIT قابل مشاهده نخواهد بود. شکل میدان های مغناطیسی ایجاد شده در اطراف آنتن ها در دو حالت متقارن و نامتقارن هندسی را نشان می دهد.



شکل ۳: (الف) مولفه Z میدان مغناطیسی در حالت متقارن $S = 0 \text{ nm}$ (ب) مولفه Z میدان مغناطیسی در حالت نامتقارن $S = 70 \text{ nm}$.

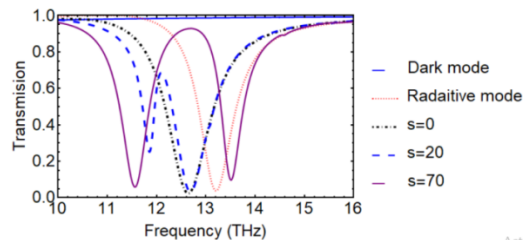
کنترل پذیری فرکانس شفافیت

کنترل رسانندگی گرافن در محدوده تراهرتز به وسیله ولتاژ ورودی یا تغییر در آرایش شیمیایی، امکان پذیر است. در این بخش فرکانس PIT را با استفاده از تغییر پتانسیل شیمیایی کنترل می کنیم. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می کنیم پتانسیل شیمیایی را از ۰.۳ تا ۰.۹ الکترون ولت تغییر داده ایم. با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن چگالی حامل های بار در آن تغییر می کند و یک انتقال فرکانسی به آبی در پاسخ طیفی بوجود می آورد.

رسانندگی سطحی گرافن توسط فرمول کوبو مدل سازی می شود که از دو بخش میان باندی و درون باندی تشکیل شده است. برای فرکانس های تراهرتزی که $\hbar\omega \ll \mu_c$ قسمت باند میانی در مقایسه با باند داخلی قابل چشم پوشی است. بنابراین در ناحیه ی تراهرتز گرافن توسط رسانندگی سطحی شبه درود بیان می شود که جایگزین خوبی برای فلزات نجیبی مانند طلا و نقره است [۶].

$$\sigma = \frac{j}{\omega + j\tau^{-1}} \frac{2e^2 K_B T}{\pi \hbar^2} \ln \left[2 \cosh \frac{\mu_c}{2K_B T} \right]$$

که در آن T دما برحسب کلونین، ω فرکانس موج الکترومغناطیس، τ زمان واهلش، μ_c پتانسیل شیمیایی (انرژی فرمی)، K_B ثابت بولتزمن، e بار الکتریکی و \hbar ثابت کاهش یافته پلانک می باشد. در شبه سازی انجام شده $\tau = 0.1 \text{ (PS)}$ ، $T = 300 \text{ (K)}$ و $\mu_c = 0.5 \text{ (eV)}$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: طیف عبوری برهم کنش نور با مدهای روشن و تاریک پلاسمونیک و نمودار ضریب عبور در کهای مختلف.

پاسخ طیفی شکل ۲ گویای این مسئله است که تابش الکترومغناطیسی خارجی به طور مستقیم با آنتن H جفت شده است. رزونانس مشاهده شده در طیف آنتن مد روشن (نقطه چین مشکی) بیانگر این برهمکنش است؛ در حالی که آنتن II هیچ برهم کنشی با این نور ندارد و پاسخ طیفی تنها یک خط صاف (خط آبی) بدون هیچ رزونانسی را نشان می دهد. هنگامی که هر دو مد تاریک و روشن، در ساختار حضور دارند، آن گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است در نانو ساختار پیشنهادی تنها در صورتی می توان اثر PIT را مشاهده کرد که تقارن هندسی شکسته شود. به محض شکست تقارن $(S \neq 0)$ ، برابری شدت میدان های ایجاد شده در اثر برهمکنش دو آنتن از بین رفته و رزونانس

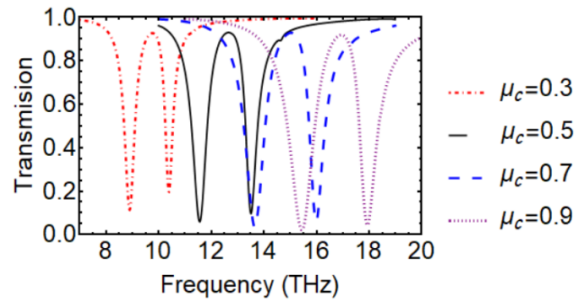
2.249 و 1.7578 و 1.5394 و 1.335 تغییر می‌دهیم که تغییرات نمودار عبور آنها در شکل ۵ آورده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضریب شکست آنتن‌ها، فرکانس PIT کاهش می‌یابد. در این پژوهش حساسیت نسبت به خلا سنجیده شده است که در جدول ۲ طول موج PIT، به همراه حساسیت (تغییرات طول موج به اختلاف ضریب شکست) همراه آورده شده است که بیشترین حساسیت مربوط به آب با مقدار $(\frac{nm}{RIU})$ 1055 می‌باشد.

نتیجه‌گیری

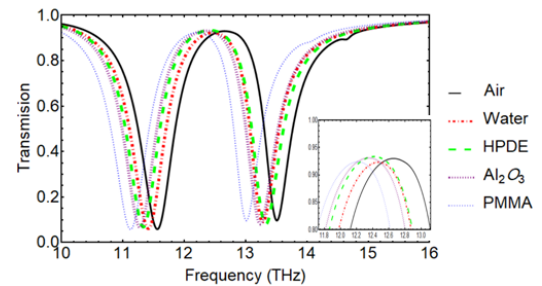
نانو ساختار گرافنی با آنتن‌هایی به شکل H-II طراحی شد. در ساختار ذکر شده در حالت نامتقارن پدیده شفافیت القایی مشاهده می‌شود. بهینه‌ترین حالت نامتقارن $S=70$ بدست آمد که در این حالت فرکانس شفافیت 12.67 THz محاسبه شد. همچنین نشان دادیم فرکانس شفافیت با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن کنترل پذیر است و با افزایش پتانسیل شیمیایی یک جابجایی به آبی در نمودار عبور بوجود می‌آید. با بررسی خاصیت حسگری ساختار به عنوان حسگر ضریب شکست میزان حساسیت $(\frac{nm}{RIU})$ 1055 برای آب بدست آمد.

مراجع

- [1] M. Fleischhauer et al., "Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media", Rev. Mod. Phys. Vol. 77, pp. 633–673, 2005.
- [2] C. L. Garrido Alzar et al., "Classical analog of electromagnetically induced transparency", P. Am. J. Phys., Vol. 70, pp. 37, 2002.
- [3] Na Liu et al., "Planar Metamaterial Analogue of Electromagnetically Induced Transparency for Plasmonic Sensing Application", NanoLett., Vol. 10, No. 4, pp. 1103–1107, 2010.
- [4] Z. Vafapour, A. Zakery, "New Regime of Plasmonically Induced Transparency", Plasmonics, Vol. 70, No. 37, pp. 1809-1815, 2015.
- [5] Z. vafapour, et al., "Graphene-based mid-infrared biosensor", OSA., Vol. 34, No. 12, pp. 2586-2592, 2017.
- [6] L.A. Falkovsky, "Optical properties of graphene", Journal of Physics: Conference Series., Vol. 129, No. 1. IOP Publishing, 2008.



شکل ۴: پاسخ طیفی ساختار برای پتانسیل شیمیایی‌های مختلف در $S=70$



شکل ۵: پاسخ طیفی ساختار به ازای ضریب شکست‌های مختلف

جدول ۲: مقدار طول موج شفافیت به همراه میزان حساسیت

ماده	n	λ (nm)	Sensitiviy(nm/RIU)
Water	1.335	24055.6	1055
HPDE	1.5394	24162.7	854
Al ₂ O ₃	1.7578	24282.5	733
PMMA	2.249	24556.3	683

کاربردهای حسگری

از کاربردهای فراماده پیشنهادی طراحی حسگرهایی بر مبنای ضریب شکست است. فرکانس شفافیت ساختار فراماده در مقابل تغییرات ضریب شکست حساس می‌باشد که این ویژگی در ساخت حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بخش با تغییر دادن جنس آنتن‌ها جابجایی فرکانس شفافیت اندازه‌گیری و حساسیت حسگر را با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم.

$$sensitivity = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}$$

با در نظر گرفتن $S=70$ به عنوان بهینه‌ترین حالت، در ابتدا جنس آنتن‌ها را خلا با ضریب شکست $n=1$ انتخاب می‌کنیم که با توجه به شکل ۲ فرکانس PIT 12.67 THz می‌باشد. سپس جنس آنتن‌ها را به Water, HPDE, Al₂O₃ و PMMA با ضریب شکست به ترتیب