



## کنترل پویای فرامواد به وسیله مد روشن-روشن پلاسمونی

سارا شورانگیز، عبدالناصر ذاکری و سعید ایزدشناس جهرمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده - در این کار به حل عددی یک ساختار فرامواد متشکل از گرافن می‌پردازیم که در آن دو حلقه شکاف دار گرافنی بر روی یک دی‌الکتریک قرار گرفته‌اند. درواقع برهمکنش مخربی که بین دو مد پلاسمونی روشن-روشن در این ساختار ایجاد می‌شود منجر به ایجاد شفافیت القایی در پاسخ های طیفی می‌شود. در واقع فاصله شکاف‌های در دو حلقه نقش مهمی را ایفا می‌کنند که ما با کم و زیاد کردن این فاصله می‌توانیم یک انتقال فرکانسی به رزونانس ایجاد شده دهیم این انتقال فرکانسی از طریق فاصله شکاف برابر با ۰.۴ تراهرتز است. علاوه بر این با تغییر ولتاژ ورودی گرافن یا تغییر در آلایش شیمیایی گرافن می‌توان محدوده این روزه شفاف را کنترل کنیم که انتقال فرکانسی آن برابر با ۶ تراهرتز است. بنابراین از دو طریق فاصله شکاف در حلقه ها و پتانسیل شیمیایی کنترل محدوده رزونانسی را ایجاد کردیم. کاربردهای که از این نوع ساختار ایجاد میشود در کلیدهای نوری، کند سازی نور، حس گرهای زیستی است.

کلید واژه- شفافیت القایی پلاسمونی، حسگر، گرافن.

## Dynamically Tunable Metamaterial through the Bright-Bright Plasmonic Modes

S. Shoranziz, A. Zakery, S. Izadshenas Jahromy

Department of physics, Shiraz university, Shiraz

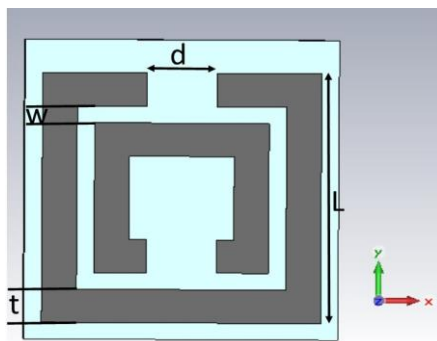
Abstract- In this work, we consider the numerical solution of a metamaterial structure consisting of graphene in which two graphene split-rings are on a dielectric. Actually, the destructive interaction created in this structure between the two bright-bright plasmonic modes leads to stimulated transparency in spectral responses. In fact, space of the two rings plays a key role that we can create a frequency transmission for the created resonance by increasing and decreasing of this space. This frequency transmission through the gap space is equal to 0.4 THz. Furthermore, by changing the graphene input voltage and changes in the chemical doping of graphene we can control the scope of this clear aperture which its frequency transmission is equal to 6 THz. So in two ways, we created the space of the gap in the rings and chemical potential of resonance range control. Applications created from this type of structure are in light switches, light slowing and biosensors.

Keywords: Plasmon Induced Transparency, Sensors, Graphene.

## ۱- مقدمه

داده که یک گزینه مناسب برای طراحی و ساخت دستگاههایی که محدوده رزونانسی را کنترل می‌کنند است چراکه با تغییر در ولتاژ ورودی یا آلایش شیمیایی گرافن می‌توان رسانندگی الکتریکی آن را تغییر داد [6]. بنابراین گرافن به‌طور گسترده در فرامواد پلاسمونی مورد بررسی قرار گرفته است.

درواقع ما در این حل عددی به بررسی فرامواده‌ای، متشکل از گرافن پرداخته‌ایم که شامل دو مد روشن-روشن پلاسمونی است که در آن از دو طریق محدوده رزونانسی پدیده PIT را کنترل کرده که یکی شکاف موجود در دو حلقه گرافنی است و دیگری تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن است.



شکل ۱: نمای ساختار در صفحه xy

## ۲- طراحی ساختار

شکل (۱) نمای ساختار پیشنهاد داده شده است که در آن یک زیر لایه از جنس شیشه با ضخامت ۲۰۰ نانومتر و اندازه  $900 \times 900$  نانومتر که ضریب گذردهی الکتریکی آن برابر با  $2.4 \times 10^4$  است. بر روی این زیر لایه دو حلقه شکاف دار از جنس گرافن استفاده شده است که ضخامت این دو حلقه گرافنی ۱ نانومتر است. مشخصات ساختاری دو حلقه شکاف دار به‌صورت  $L=750$  nm و  $t=100$  nm و  $w=50$  nm و  $d=50, 100, 150, 200, 250$  nm است. شرط مرزی که برای این شبیه‌سازی استفاده شده است به‌صورت سلول واحد است که به‌صورت دوره‌ای تکرار می‌شود که میدان الکتریکی در راستای محور xها و میدان مغناطیسی در راستای محور yها انتخاب شده است و محل ورود نور و قرار گرفتن پورت‌ها در راستای محور zها است. برای شبیه‌سازی این ساختار از نرم افزار CST Studio Suite استفاده شده است که روش ادغام محدود برای حل معادلات استفاده می‌کند.

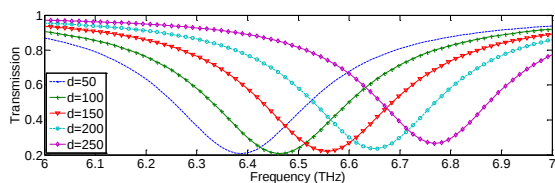
با پیشرفت های صورت گرفته در زمینه آشکارسازی تشدیدهای پلاسمونی، شفافیت القایی پلاسمونی به عنوان یک روش جدید جهت تولید شفافیت القایی مخصوصا در فرامواد مورد توجه بسیاری قرار گرفت است [1]. در این روش از ساختارهای پلاسمونی خاص جهت تداخل مدهای پلاسمونی استفاده می شود. مد روشن با نور فرودی به‌طور مستقیم برهمکنش می‌کند اما دارای تلفات زیادی است اما مد تاریک با نور فرودی به‌طور مستقیم برهمکنش نمی‌کند و به‌واسطه برهمکنش مد روشن با نور فرودی برانگیخته می‌شود و تلفات بسیار کمی دارد [2-4]. نوع جفت شدگی مدهای پلاسمونی یک ساختار به هندسه ساختار و نوع قطبش نور فرودی وابسته است. بنابراین جفت شدگی ها می‌تواند یک جفت شدگی مد تاریک-روشن، روشن-روشن باشد. تداخل ویرانگری که بین دو مد ایجاد شده صورت می گیرد باعث ایجاد یک شفافیت می شود که نتیجه یک فرو رفتگی در قسمت موهومی قطبش پذیری و تغییرات تند قطبش پذیری در همان ناحیه طیفی می باشد که نشان دهنده کاهش جذب و ایجاد نور کند به وسیله این ساختار پلاسمونی است. پدیده شفافیت القایی پلاسمونی (PIT, Plasmon Induced Transparency) کاربردهای زیادی در کلیدهای نوری، کند سازی نور، حس‌گرهای زیستی دارند [5]. تا به حال ساختارهایی که برای پدیده PIT پیشنهاد شده بود در یک فرکانس ثابت بود و برای تغییر محدوده رزونانسی باید تغییراتی را در پارامترهای فیزیکی ساختار ایجاد می‌کردند. اما در مواردی که ساختار طراحی می‌شود تغییر پارامترهای فیزیکی ساختار امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین انتخاب محدوده رزونانسی بسیار پراهمیت می‌باشد.

روش‌های متفاوتی برای ایجاد یک شفافیت قابل کنترل همانند استفاده از مواد غیرخطی، کریستال‌های مایع، تغییر فاز مواد وجود دارد. گرافن یکی از بهترین موادی است که می‌توان برای کنترل محدوده رزونانسی از آن استفاده نمود. گرافن یک ماده دوبعدی به شکل لانه‌زنبوری است که خواصی فوق‌العاده در رسانندگی الکتریکی دارد و گرافن را به ماده‌ای خاص تبدیل کرده است. در محدوده فرکانسی تراهرتزی سهم برهمکنش‌های درون بانندی غالب است که باعث می‌شود گرافن همانند یک فلز عمل کند. گرافن نشان

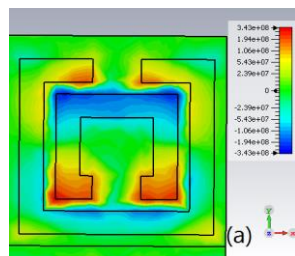
(b)

شکل ۲: نمودارهای (a) عبور (b) جذب

برهمکنش میدانی این دو نانو حلقه شکاف دار به وسیله فاصله شکاف که با پارامتر  $d$  مشخص می شود قابل کنترل است که این ویژگی را به این ساختار می دهد که تغییر  $d$  در آن یک انتقال فرکانسی برای پاسخ های طیفی آن ایجاد می نماید. حال با تغییر  $d=250, 200, 150, 100, 50$  nm نمودار عبوری را برای رزونانس  $\omega_2$  بررسی می کنیم که در شکل (۳) انتقال فرکانسی آن را نمایش داده ایم.

شکل ۳: نمودار عبور برای تغییر پارامتر  $d$ 

برای بررسی توزیع میدانی از شکل (۴) استفاده می کنیم که در آن دو دوقطبی الکتریکی در دو حلقه تشکیل شده است که نشان از برهمکنش مستقیم نور فرودی با هر دو المان است و ایجاد دو رزونانس  $\omega_1$  و  $\omega_2$  می کند و با بررسی توزیع میدان مغناطیسی مشخص می شود که دو جریان خلاف هم در دو حلقه القاشده است و شکاف بین حلقه ها به عنوان محل ذخیره انرژی کاربرد دارد و با تغییر در فاصله شکاف برهمکنش بین این دوقطبی کنترل می شود در واقع برهمکنشی که این دو جریان خلاف هم ایجاد می کنند باعث برهمکنش مخرب در این ساختار می شود و نتیجه آن از بین رفتن جذب در فرکانس تشدید می شود که نمایش دهنده پدیده EIT در این ساختار است.



در این شبیه سازی گرافن را یک لایه بسیار نازک در نظر می گیریم که رسانندگی سطحی آن توسط فرمول کوپو داده می شود. رسانندگی گرافن شامل دو سهم درون بانندی و میان بانندی است که سهم برهمکنش های درون بانندی در محدوده تراهرتزی غالب است [7].

$$\sigma = \frac{j}{\omega + j/\tau} \frac{e^2 2k_B T}{\pi \hbar^2} \ln \left[ 2 \cosh \frac{\mu_c}{2k_B T} \right] + \frac{e^2}{4\hbar} \left[ G\left(\frac{\hbar\omega}{2}\right) + j \frac{4\hbar\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{G(\zeta) - G\left(\frac{\hbar\omega}{2}\right)}{(\hbar\omega)^2 - 4\zeta^2} d\zeta \right] \quad (1)$$

$$G(\zeta) = \frac{\sinh\left(\frac{\zeta}{k_B T}\right)}{\left[ \cosh\left(\frac{\mu_c}{k_B T}\right) + \cosh\left(\frac{\zeta}{k_B T}\right) \right]}$$

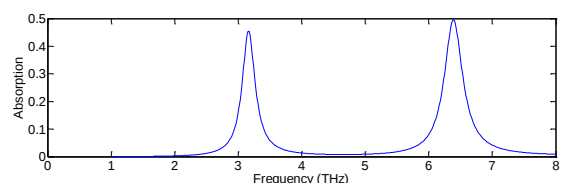
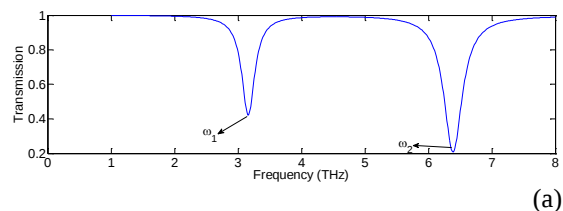
که در آن  $\tau$  آهنگ واهلش برای گذارهای باندی است،  $\mu_c$  پتانسیل شیمیایی،  $T$  دما برحسب درجه کلون،  $\omega$  فرکانس زاویه ای است. برای محاسبه تابع دی الکتریک گرافن از رابطه زیر استفاده می کنیم:

$$\varepsilon = 1 + \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0 d_1} \quad (2)$$

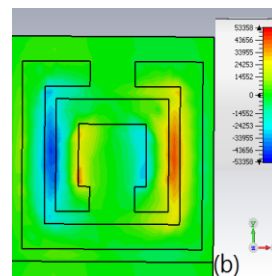
که در آن  $d_1$  ضخامت گرافن استفاده شده در ساختار است.

### ۳- بررسی ساختار و نتایج شبیه سازی

همان طوری که قبلاً بیان شد ساختار از دو مد روشن روشن تشکیل شده است که به وسیله نور فرودی هر دو مد روشن تحریک می شوند و ایجاد رزونانس در محدوده فرکانسی می کنند و از هم پوشانی این دو رزونانس پدیده PIT در پاسخ های طیفی نمایش داده می شود که باعث کاهش جذب می شود. نمودار عبور و جذب را می توان در شکل (۲) مشاهده نمود.



که همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود به ازای پتانسیل شیمیایی ۰,۲ فرکانس رزونانس  $\omega_2$  در ۵,۲ تراهرتز و به ازای ۰,۳ در ۶,۳۹ و برای ۰,۴ در ۷,۴ و برای ۰,۵ در ۸,۱ و برای ۰,۶ در ۸,۹ و برای ۰,۷ در ۹,۷ و برای ۰,۸ در ۱۰,۴۱ و برای ۰,۹ در ۱۱ تراهرتز رزونانس اتفاق می‌افتد. بنابراین ما با تغییر پتانسیل شیمیایی یک انتقال فرکانسی از ۵,۲ تا ۱۱ تراهرتز را ایجاد کرده‌ایم.



شکل ۴: توزیع میدانی (a) الکتریکی (b) مغناطیسی در صفحه xy

## ۵- نتیجه‌گیری

با معرفی یک ساختار فراماده از جنس گرافن که از دو حلقه شکاف دار استفاده شده است که نقش دو مد روشن پلاسمونی را ایفا می‌کنند محدوده فرکانسی تراهرتزی را پوشش داده‌ایم که این کنترل شونده محدوده فرکانسی از دو طریق امکان‌پذیر شد. در ابتدا از طریق فاصله شکاف دو حلقه که اختلاف فرکانسی ۰,۴ تراهرتزی را ایجاد کرد و در ادامه با تغییر پتانسیل شیمیایی اختلاف فرکانسی ۶ تراهرتزی را ایجاد کرده‌ایم. چنین ساختارهایی مناسب برای کاربردهایی از قبیل کلیدهای نوری و حسگرهای زیستی می‌باشند.

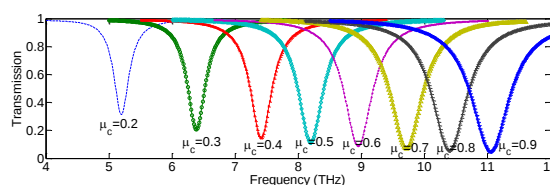
## مراجع

- [1] Marangos, Jonathan P. "Electromagnetically induced transparency." *Journal of Modern Optics*, Vol. 45, No. 3, pp. 471-503, 1998.
- [2] Zhang, Shuang, et al. "Plasmon-induced transparency in metamaterials." *Physical Review Letters*, Vol. 101, No. 4, pp. 047401, 2008.
- [3] P. Nordlander, C. Oubre, E. Prodan, K. Li, and M. I. Stockman, "Plasmon Hybridization in Nanoparticle Dimer," *Nano Lett.*, vol. 4, pp. 899-903, 2004.
- [4] M. Janipour, T. Pakizeh, and F. Hodjat-Kashani, "Strong optical interaction of two adjacent rectangular nanoholes in a gold film," *Opt. Express*, vol. 21, pp. 31769-31781, 2013.
- [5] Wu, Chihhui, Alexander B. Khanikaev, and Gennady Shvets. "Broadband slow light metamaterial based on a double-continuum Fano resonance." *Physical review letters*, Vol. 106, No. 10, pp. 107403, 2011.
- [6] A Vakil, N Engheta, "Transformation optics using graphene," *Science* 332 (6035), pp. 1291-1294, 2011.
- [7] Falkovsky, L. A. "Optical properties of graphene." *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 129. No. 1. IOP Publishing, 2008.
- [8] Wang, Feng, et al. "Gate-variable optical transitions in graphene." *Science*, Vol. 320, No. 5873, pp. 206-209, 2008.
- [9] Liu, S., Yang, W. X., Zhu, Z., & Lee, R. K. "Effective terahertz signal detection via electromagnetically induced transparency in graphene." *JOSA B*, Vol. 33, No. 2, pp. 279-285, 2016.

بنابراین با تغییر اندازه شکاف در دو حلقه یک انتقال فرکانسی ایجاد کردیم که در آن به ازای  $d=50$  nm فرکانس ۶,۳۹ و برای  $d=100$  nm در ۶,۴۶ و  $d=150$  nm در ۶,۵۵ و  $d=200$  nm در ۶,۶۶ و  $d=250$  nm در ۶,۷۶ تراهرتز است.

## ۴- بررسی تغییر پتانسیل شیمیایی

دو حلقه شکاف دار از جنس گرافن هستند. گرافن به دلیل کنترل رسانندگی در محدوده تراهرتزی به‌وسیله ولتاژ ورودی یا تغییر در آلایش شیمیایی آن، به ماده‌ای منحصربه‌فرد تبدیل کرده است. رسانندگی الکتریکی گرافن دو سهم درون باندی و میان باندی دارد که در محدوده تراهرتزی سهم برهمکنش انتقالات درون باندی غالب است و مدل درود برای آن برقرار است بنابراین بهترین جایگزین برای فلزات نجیبی همانند طلا و نقره است [8]. بنابراین در این قسمت سعی در کنترل محدوده رزونانسی با استفاده از تغییر پتانسیل شیمیایی در گرافن داریم که باعث می‌شود یک ساختار با کنترل محدوده رزونانسی داشته باشیم [9]. همان‌طوری که در شکل (۵) مشاهده می‌کنیم پتانسیل شیمیایی را از ۰,۲ تا ۰,۹ الکترون‌ولت با گام‌های ۰,۱ الکترون‌ولتی افزایش داده‌ایم و توانسته‌ایم یک انتقال فرکانسی ایجاد کنیم و دلیل آن این است که با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن چگالی حامل‌های بار در آن تغییر می‌کند بنابراین می‌توانیم یک انتقال فرکانسی در پاسخ‌های طیفی ایجاد کنیم.



شکل ۵: نمودار عبور برای پتانسیل شیمیایی های متفاوت