بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# 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 قرارگرفته‌اند. 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 باکم و زیاد کردن این فاصله می‌توانیم یک انتقال فرکانسی به رزونانس ایجادشده 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 روزنه 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، حس‌گرهای زیستی است.**

کلید واژه- شفافیت القایی پلاسمونی، حسگر، گرافن.

# Dynamically Tunable Metamaterial through the Bright-Bright Plasmonic Modes

S. Shorangiz, 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 transparence 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.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]



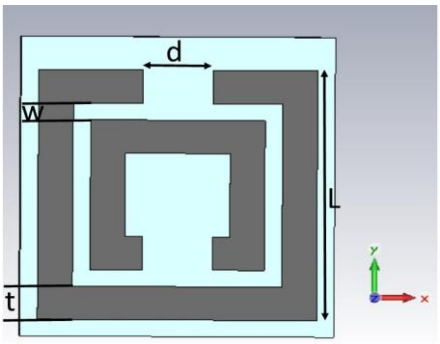
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

## ۱- مقدمه

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[4-2]. 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 فرورفتگی 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]. تابه‌حال 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 قابل‌کنترل 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 باندی غالب است که باعث می‌شود گرافن همانند یک فلز عمل کند. گرافن نشان 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 موردبررسی قرارگرفته 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.




شکل۱: نمای ساختار در صفحه xy

## ۲- طراحی ساختار

شکل(۱) نمای ساختار پیشنهاد داده‌شده است که در آن یک زیر لایه از جنس شیشه باضخامت ۲۰۰ نانومتر و اندازه ۹۰۰*۹۰۰ نانومتر که ضریب گذردهی الکتریکی آن برابر با ۲,۴۰۲۵ است. بر روی این زیر لایه دو حلقه شکاف دار از جنس گرافن استفاده‌شده 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 استفاده‌شده است به‌صورت سلول واحد است که به‌صورت دوره‌ای تکرار می‌شود که میدان الکتریکی در راستای محور xها و میدان مغناطیسی در راستای محور yها انتخاب‌شده است و محل ورود نور و قرار گرفتن پورت ها 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.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]

در این شبیه‌سازی گرافن را یک‌لایه بسیار نازک در نظر می‌گیریم که رسانندگی سطحی آن توسط فرمول کوبو داده می‌شود. رسانندگی گرافن شامل دو سهم درون باندی و میان باندی است که سهم برهمکنش‌های درون باندی در محدوده تراهرتزی غالب است[7].

$$\sigma = \frac{j}{\omega + j/\tau}\frac{e^2 2k_B T}{\pi\hbar^2}\ln\left[2\cosh\frac{\mu_c}{2k_B T}\right] + \frac{e^2}{4\hbar}\left[G\left(\frac{\hbar\omega}{2}\right) + j\frac{4\hbar\omega}{\pi}\int_0^\infty \frac{G(\zeta)-G\left(\frac{\hbar\omega}{2}\right)}{(\hbar\omega)^2-4\zeta^2}d\zeta\right] \quad (۱)$$

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

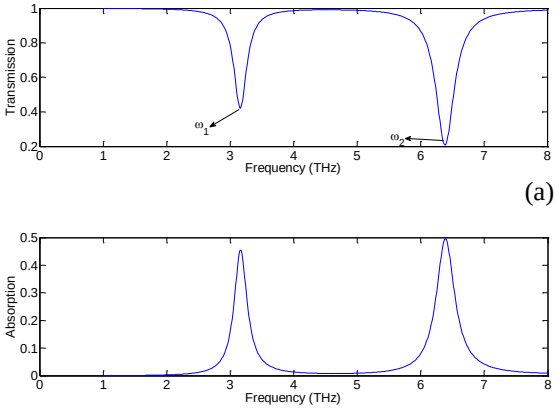
که در آن $\tau$ آهنگ واهلش برای گذارهای باندی است، $\mu_c$ پتانسیل شیمیایی، $T$ دما برحسب درجه کلوین، $\omega$ فرکانس زاویه‌ای است. برای محاسبه تابع دی‌الکتریک گرافن از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\varepsilon = 1 + \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0 d_1} \quad (۲)$$

که در آن $d_1$ ضخامت گرافن استفاده‌شده در ساختار است.

## ۳- بررسی ساختار و نتایج شبیه‌سازی

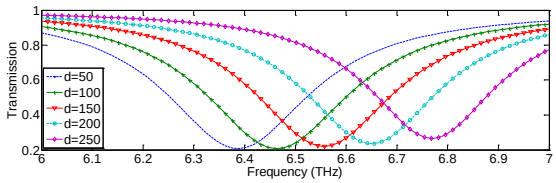
همان‌طوری که قبلاً بیان شد ساختار از دو مد روشن‌روشن تشکیل‌شده است که به‌وسیله نور فرودی هر دو مد روشن تحریک می‌شوند و ایجاد رزونانس در محدوده فرکانسی می‌کنند و از همپوشانی این دو رزونانس پدیده PIT در پاسخ‌های طیفی نمایش داده می‌شود که باعث کاهش جذب می‌شود. نمودار عبور و جذب را می‌توان در شکل(۲) مشاهده نمود.




(b)

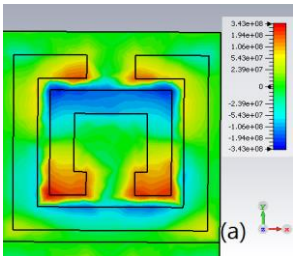
شکل۲: نمودارهای (a) عبور (b) جذب

برهمکنش میدانی این دو نانو حلقه شکاف دار به‌وسیله فاصله شکاف که با پارامتر d مشخص می‌شود قابل‌کنترل است که این ویژگی را به این ساختار می‌دهد که تغییر d در آن یک انتقال فرکانسی برای پاسخ‌های طیفی آن ایجاد می‌نماید. حال با تغییر d=250,200,150,100,50 nm نمودار عبوری را برای رزونانس $\omega_2$ بررسی می‌کنیم که در شکل(۳) انتقال فرکانسی آن را نمایش داده‌ایم.




شکل۳: نمودار عبور برای تغییر پارامتر d

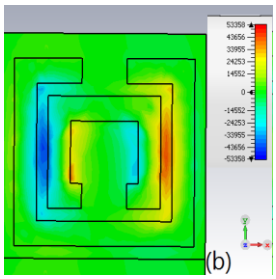
برای بررسی توزیع میدانی از شکل(۴) استفاده می‌کنیم که در آن دو دوقطبی الکتریکی در دو حلقه تشکیل‌شده است که نشان از برهمکنش مستقیم نور فرودی با هر دو المان است و ایجاد دو رزونانس $\omega_2$ و $\omega_1$ می‌کند و با بررسی توزیع میدان مغناطیسی مشخص می‌شود که دو جریان خلاف هم در دو حلقه القاشده است و شکاف بین حلقه‌ها به‌عنوان محل ذخیره انرژی کاربرد دارد و با تغییر در فاصله شکاف برهمکنش بین این دوقطبی کنترل می‌شود درواقع برهمکنشی که این دو جریان خلاف هم ایجاد می‌کنند باعث برهمکنش مخرب در این ساختار می‌شود و نتیجه آن از بین رفتن جذب در فرکانس تشدید می‌شود که نمایش‌دهنده پدیده EIT در این ساختار است.






این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]

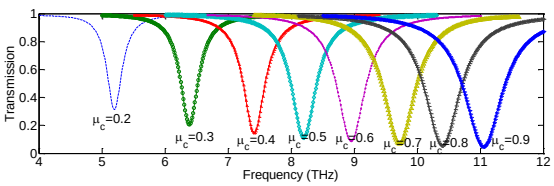



شکل۴: توزیع میدانی (a) الکتریکی (b) مغناطیسی در صفحه xy

بنابراین با تغییر اندازه شکاف در دو حلقه یک انتقال فرکانسی ایجاد کردیم که در آن به ازای d=50 nm در 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 شیمایی گرافن چگالی حامل‌های بار در آن تغییر می‌کند بنابراین می‌توانیم یک انتقال فرکانسی در پاسخ‌های طیفی ایجاد کنیم.




شکل۵: نمودار عبور برای پتانسیل شیمیایی های متفاوت

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.

## ۵- نتیجه‌گیری

با معرفی یک ساختار فراماده از جنس گرافن که از دو حلقه شکاف دار استفاده‌شده است که نقش دو مد روشن پلاسمونی را ایفا می‌کنند محدوده فرکانسی تراهرتزی را پوشش داده‌ایم که این کنترل شوندگی محدوده فرکانسی از دو طریق امکان‌پذیر شد. در ابتدا از طریق فاصله شکاف در 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.




این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]