

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه خوارزمی،  
تهران، ایران.  
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸



## طراحی جاذب فراماده چند بانده و تنظیم پذیر مبتنی بر گرافن در محدوده تراهرتز

پریسا پورپارس، سعید گل محمدی هریس  
دانشگاه تبریز

**خلاصه-** در این مقاله یک جاذب فراماده سه بعدی در حوزه تراهرتز با استفاده از گرافن الگو شده طراحی شده است. با استفاده از خاصیت تنظیم پذیری هدایت سطحی گرافن، قابلیت تنظیم پذیری در ساختار جاذب با تغییر پتانسیل شیمیایی امکان پذیر است. نتایج شبیه سازی جذب بیش از ۹۵٪ در سه باند وسیع در حوزه تراهرتز به ترتیب در طول موج های  $\lambda = 31/5 \mu\text{m}$  و  $\lambda = 37/2 \mu\text{m}$  و  $\lambda = 51 \mu\text{m}$  را نشان می دهد. جاذب از آرایه گرافنی الگو شده متناوب بر روی لایه ای از طلا که با دی الکتریک ضخیم از جنس  $\text{SiO}_2$  جدا شده است، شکل یافته است. به دلیل تقارن چهار قسمتی الگوی گرافنی مورد استفاده، جذب ساختار ارائه شده، مستقل از قطبش می باشد که در حوزه تراهرتز هم می تواند در سنسور ها و سیستم های سویچینگ به کار برده شود. کلمات کلیدی- پتانسیل شیمیایی، تنظیم پذیری، جاذب، گرافن

## Design of Tunable Metamaterial Absorber Based on Graphene in Terahertz Frequency Range

Parisa.pourpars, Saeed.golmohammadi  
Parisa.pourpars96@ms.tabrizu.ac.ir  
Sgolmohammadi@tabrizu.ac.ir

**Abstract-** In this article a three dimensional metamaterial absorber in terahertz frequency range has been designed using of patterned Graphene. By using the tunability of surface conductivity in Graphene and changing the chemical potential the tunability is possible in the absorber. The simulation results shows about 95% absorption in three broad bands in  $\lambda=31/5\mu\text{m}$  ,  $\lambda = 37/2 \mu\text{m}$  and  $\lambda=51 \mu\text{m}$  in the terahertz range. The structure absorber is composed of Graphene Array on top of the Gold separated by  $\text{SiO}_2$  thick dielectric layer. Finally, because of four-fold symmetry in the structure, polarization independent absorption for this structure is achieved, where proposed structure can be employed in sensors and switching systems.

Keywords- Absorber, Chemical Potential, Graphene , Tunable.

### ۱-مقدمه

اولین جاذب کامل فراماده در محدوده فرکانسی میکروویو توسط لندی و همکارانش نشان داده شد [۱]. طراحی جاذب های کامل فراماده پس از مدتی با تبدیل مقیاس به محدوده فرکانسی تراهرتز منتقل شد [۲].

بسیاری از جاذب های موج الکترومغناطیس رایج نیازمند ضخامت حداقل  $\lambda_0/4$  هستند، که  $\lambda_0$  طول موج مرکزی نور تابشی است. با این حال، جاذب های فراماده ابزار کارآمدی برای کاهش این ضخامت فراهم می کنند [۳]. گرافن، تک لایه ای از اتم های کربن چیده شده در شبکه لانه زنبوری [۴،۵،۶] کاربردهای زیادی در زمینه

می‌دهد. در شکل ۱-الف) تصویر سه بعدی ساختار نشان داده شده است. شکل ۱-ب) دید از بالای یک واحد سلولی و پارامترهای هندسی ساختار را نشان می‌دهد. ضخامت  $\text{SiO}_2$  و طلا به ترتیب با  $t_{\text{SiO}_2}$  و  $t_{\text{Au}}$  نشان داده شده است.

گرافن به دلیل ضخامت تک-اتمی، می‌تواند به عنوان سطح بی نهایت نازک در نظر گرفته شود. مناسب‌ترین پارامتر برای مشخص کردن خواص الکترومغناطیسی گرافن با ساختار باند الکترونیکی بدون شکاف، رسانایی آن است. از این رو ورقه گرافنی با رسانایی سطحی مدل می‌شود [۱۲]. در این جا، آرایه گرافنی می‌تواند با استفاده از رسانایی سطحی مدل شود [۱۱]:

$$\sigma(\omega, \mu_c, \tau) = -\frac{e^2 \mu_c}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i/\tau} \quad (1)$$

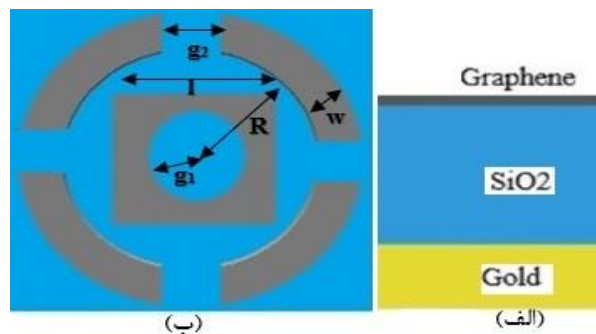
در اینجا  $i$  ضریب واحد موهومی،  $e$  واحد بار الکترون،  $\hbar$  ثابت پلانک کاهش یافته،  $\omega$  فرکانس زاویه ای نور فرودی و  $\tau$  زمان واهلش الکترون-فونون می‌باشد. هدایت سطحی گرافن به صورت دینامیکی در طول موج های مختلف با تغییر سطح فرمی و زمان واهلش تغییر می‌کند. می‌توان  $\tau$  و  $\mu_c$  را با تزریق شیمیایی، بایاس ولتاژ ورودی یا پمپ نوری [۱۱] میزان جذب و طول موج قله‌های رزونانسی جذب طراحی شده را تنظیم کرد.

در ادامه، ساختارهای ارائه شده و عملکرد جذبی آن‌ها ارائه و با فیزیک چندگانه نرم افزار لومریکال مبتنی بر روش المان محدود بررسی خواهد شد. در محیط شبیه‌سازی در جهت  $x$ - و  $y$ - شرایط مرزی پرپودیک اعمال می‌شود، و در جهت  $z$ - شرایط مرزی لایه جذبی کاملا تطبیق شده به کار می‌رود. شبکه غیر یکنواخت برای تضمین دقت شبیه‌سازی های عددی به کار برده شده است. مطابق با بقاء انرژی، جذب می‌تواند از طریق  $A = 1 - R - T$  به دست آید، که در آن  $R$  بازتاب و  $T$  انتقال است. چون ضخامت فیلم طلای استفاده شده خیلی بزرگ تر از عمق پوستی نمونه است، انتقال را می‌توان نادیده گرفت. پس،  $T = 0$  همیشه در این ساختار برقرار است، و عبارت  $A = 1 - R$  در مبحث نتایج شبیه‌سازی استفاده

پلاسمونیک و فرامواد در فرکانس های تراهرتز و فروسرخ دارد [۴،۵،۶]. خواص مکانیکی، الکترونیکی، نوری، و حتی حرارتی گرافن با تزریق شیمیایی و اعمال سیگنال الکتریکی قابل تنظیم است [۴،۷،۸]. گرافن یک نیم‌رسانای نازک اتمی است، که چگالی الکترون، و بنابراین فرکانس پلاسما آن خیلی کمتر از فلزات نجیب است. در نتیجه، گرافن می‌تواند پلاسمون-پلاریتون‌های سطحی را همانند یک فلز نجیب پشتیبانی کند، در حالی که فرکانس کاری آن خیلی کمتر از فلزات و در محدوده تراهرتز و فروسرخ است [۴،۹]. در نتیجه گرافن برای استفاده در فرامواد در بازه تراهرتز گزینه‌ای مطلوب است [۱۰].

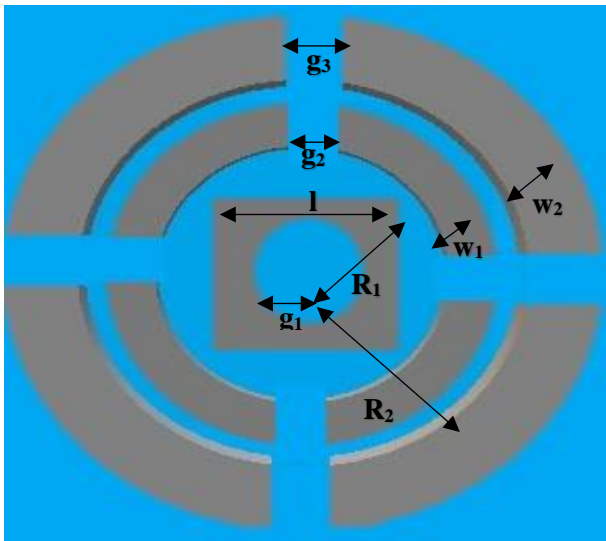
اغلب پژوهش‌ها بر روی جاذب های فراماده ای تک-باندی انجام یافته‌اند، و تحقیقات به ندرت جاذب‌های فراماده‌ای چند-باندی و باند وسیع را شامل می‌شوند [۱۱]. در این مقاله، یک جاذب مبتنی بر آرایه گرافن طراحی و به صورت تئوری بررسی شده است. نتایج شبیه سازی دستیابی به جذب تقریباً واحد در سه باند جذبی در محدوده ۳ تا ۱۰ تراهرتز نشان می‌دهد و قله جذب آن‌ها به دلیل تنظیم پذیری هدایت گرافن می‌تواند با تغییر سطح فرمی تغییر کند. جاذب ارائه شده به دلیل تقارن ساختار غیر حساس به قطبش است و می‌تواند جذب سه-باندی تقریباً کامل را در یک محدوده وسیع از زوایای فرودی نگه دارد.

## ۲- ساختار و روش‌ها



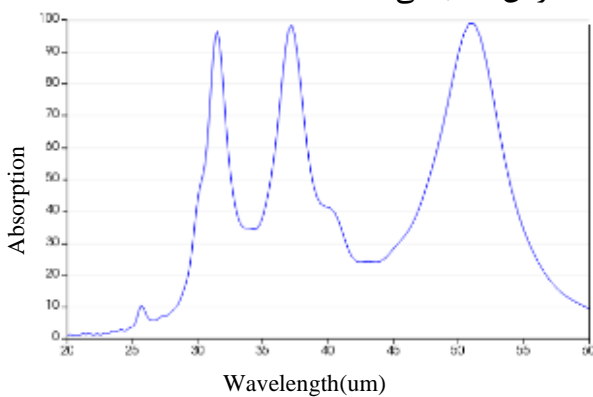
شکل ۱: الف) نمایش لایه های سه گانه ساختار. ب) نمایش گرافن الگو شده

شکل ۱ سلول واحد ساختار جاذب متشکل از آرایه ای متناوب از تک لایه گرافنی الگو یافته بر روی لایه ای از طلا که با یک لایه ضخیم  $\text{SiO}_2$  از جدا شده است را نشان



شکل ۳: نمایش گرافن الگو شده با دو رینگ

جهت بهبود جذب مطابق شکل ۳ یک رینگ دیگر به ساختار اضافه می‌کنیم. طیف جذبی ساختار در شکل ۴ ارائه شده است. مقادیر به دست آمده از راه سعی و خطا در شکل ۳ عبارتند از:  $g_1 = 0.105 \mu m$ ،  $l = 0.16 \mu m$ ،  $R_1 = 0.165 \mu m$ ،  $w_1 = 0.145 \mu m$  و  $g_2 = 0.15 \mu m$ ،  $w_2 = 0.3775 \mu m$  و  $R_2 = 0.165 \mu m$ ،  $g_3 = 0.4275 \mu m$  با مشاهده طیف جذبی در می‌یابیم که در سه باند وسیع جذب تقریباً ۱۰۰٪ به دست آمده است. رزونانس پلاسمون های سطحی محلی تشکیل شده در سطح گرافن بخشی از انرژی فرودی را در لایه  $SiO_2$  نزدیک گرافن جذب می‌کند.



شکل ۴: طیف جذبی ساختار شکل ۳ که در طول موج های  $\lambda = 21/5 \mu m$  و  $\lambda = 37/2 \mu m$  و  $\lambda = 51 \mu m$  سه قله جذب باند وسیع تقریباً ۱۰۰٪ مشاهده می‌شود.

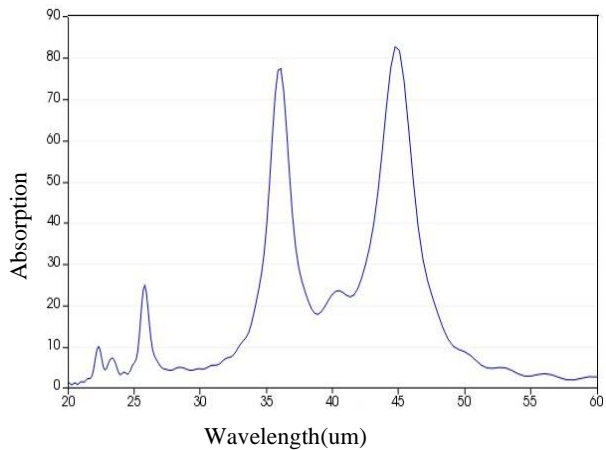
هر دو رزونانس الکتریکی و مغناطیسی منجر به حبس

می‌شود. بنابراین، اگر  $R = 0$  باشد، جذب کامل  $A = 1$  خواهد بود [۱۱].

### ۳- بحث ونتایج

عملکرد جذبی ساختار نشان داده شده در شکل ۱ تحت تابش عمودی در شکل ۲ رسم شده است. پس از تغییرات در پارامترهای ساختار و سعی و خطا، پارامترهای هندسی به ترتیب،  $P = 3 \mu m$ ،  $T_{SiO_2} = 4/7 \mu m$  و  $T_{Au} = 0/45 \mu m$  به دست آمده است. ثابت دی الکتریک  $SiO_2$  و رسانایی طلا به ترتیب  $\epsilon_r = 3/9$  و  $\sigma_{Au} = 4/7 \times 10^7 S/m$  هستند [۱۱].

طیف جذبی ساختار در شکل ۲ ارائه شده است. مقادیر به دست آمده از راه سعی و خطا به صورت  $g_1 = 0.105 \mu m$ ،  $w = 0.145 \mu m$  و  $g_2 = 0.15 \mu m$ ،  $R = 0.165 \mu m$ ،  $l = 0.16 \mu m$ ،  $w_2 = 0.3775 \mu m$  انتخاب شده اند.



شکل ۲: طیف جذبی ساختار شکل ۱-ب) که در طول موج های  $\lambda = 35/846 \mu m$  و  $\lambda = 44/7 \mu m$  دو قله جذبی ۸۰٪ مشاهده می‌شود.

7181-7188.

[3] Cheng, Y., Yang, H., Cheng, Z., & Wu, N. (2011). Perfect metamaterial absorber based on a split-ring-cross resonator. *Applied Physics A*, 102(1), 99-103.

[۴] Boltasseva, A., & Atwater, H. A. (2011). Low-loss plasmonic metamaterials. *Science*, 331(6015), 290-291.

[5] Morozov, S. V., Novoselov, K. S., Geim, A. K., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., ... & Mussell, J. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science (New York, NY)*.

[6] Novoselov, K. S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T. J., Khotkevich, V. V., Morozov, S. V., & Geim, A. K. (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10451-10453.

[7] Jablan, M., Buljan, H., & Soljačić, M. (2009). Plasmonics in graphene at infrared frequencies. *Physical review B*, 80(24), 245435.

[8] Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T., & Ferrari, A. C. (2010). Graphene photonics and optoelectronics. *Nature photonics*, 4(9), 611.

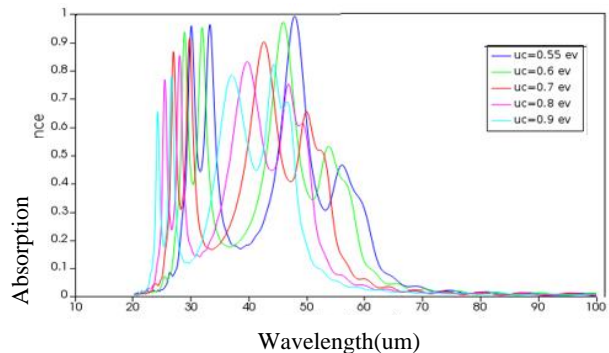
[9] Neto, A. C., Guinea, F., Peres, N. M., Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of modern physics*, 81(1), 109.

[10] He, X., Yao, Y., Zhu, Z., Chen, M., Zhu, L., Yang, W., ... & Jiang, J. (2018). Active graphene metamaterial absorber for terahertz absorption bandwidth, intensity and frequency control. *Optical Materials Express*, 8(4), 1031-1042.

[11] Zhang, J., Tian, J., & Li, L. (2018). A dual-band tunable metamaterial near-unity absorber composed of periodic cross and disk graphene arrays. *IEEE Photonics Journal*, 10(2), 1-12.

[12] Shi, Y., & Zhang, Y. (2018). Design of Graphene-Based Metamaterial Absorber and Antenna. In *Metamaterials and Metasurfaces*. IntechOpen.

و اتلاف انرژی الکترومغناطیسی فرودی می‌شوند [۱۱]. در شکل ۵ نتایج حاصل از تغییر پتانسیل شیمیایی و ثابت زمانی گرافن نشان داده شده است. مشاهده می‌کنیم که به ازای  $\mu_c = 0.55 \text{ eV}$  بیشترین جذب را داریم و با افزایش و کاهش پتانسیل شیمیایی طول موج رزونانس شیف می‌کند و شرایط تطبیق امپدانس به امپدانس فضای آزاد از بین می‌رود و در نتیجه جذب کاهش می‌یابد.



شکل ۵. طیف جذبی ساختار شکل ۳ در مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی

طیف جذبی ساختار برای تابش TM و TE به دلیل تقارن ساختار الگو شده طیف جذبی تقریباً مستقل از زاویه تابش می‌باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه، یک جاذب سه بانده پریودیک با جذب نزدیک به ۱۰۰٪ در حوزه تراهرتز با حلقه‌های شکاف‌دار گرافن الگو شده بر روی دی الکتریک  $\text{SiO}_2$  که روی لایه طلا قرار گرفته است، ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که در سه طول موج رزونانسی شرایط تطبیق امپدانس فراهم و جذب کامل به دست می‌آید. همچنین تنظیم پذیری جاذب با تغییر پتانسیل شیمیایی نشان داده شد. در نهایت به دلیل تقارن ساختار جذب مستقل از قطبش به دست آمد.

#### ۵- مرجع

[1] Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20), 207402.

[2] Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., & Padilla, W. J. (2008). A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization. *Optics express*, 16(10),