

فیلتر میان گذر قابل تنظیم مبتنی بر گرافین در باند فرکانسی تراهرتز

امین قهرمانی^۱ غلامرضا مرادی^۲ رضا صراف شیرازی^۳

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

aghahramany@aut.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

ghmoradi@aut.ac.ir

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

sarraf@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی و شبیه سازی فیلتر میانگذر مبتنی بر گرافین پهن باند قابل تنظیم در باند تراهرتز ارائه شده است. این فیلترهای مسطح پلاسمونیک پهن باند در نوع خود منحصر به فرد هستند. با استفاده از این روش، می توان فیلترهای میان گذر با ویژگی های عملکردی مورد نظر در قالب استاب های رزونانسی مدار باز طراحی کرد. اثر ناپیوستگی استاب مدار باز مورد استفاده در این نوع فیلتر مورد بررسی قرار گرفته و طول لازم برای جبران سازی بدست آمده است. پاسخ فرکانسی بدست آمده فیلتر میان گذر، پهنای باند نسبی ۳۰٪ به همراه باندگذار مطلوب سطح تضعیف قابل قبول و تاخیر گروه ثابت را نشان می دهد. اثر ناپیوستگی خطوط مدار باز فیلتر در نظر گرفته شده و کاملاً تأیید شده است. پاسخ فرکانسی فیلتر در غیاب اثر ناپیوستگی، فرکانس مرکزی ۴,۷THz را نشان می دهد در حالی که با اعمال آن، به فرکانس مرکزی مورد نظر یعنی ۵THz جابجا می شود. این نوع فیلترها به علت ساختار فشرده و طراحی ساده، انتخاب مناسبی برای استفاده در مدارهای مسطح تمام فشرده سیستم های تراهرتز هستند.

کلمات کلیدی: تراهرتز، ناپیوستگی مدار باز، GNR، فیلتر، رزوناتور ربع طول موج، موج پلاسمونیک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۷/۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴

نام نویسنده مسئول: دکتر غلامرضا مرادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان حافظ - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی برق

سازگاری الکترومغناطیسی است که به منظور استفاده در یک مدار مجتمع فشرده قرار داده می‌شود.

فیلتر میان گذر ارائه شده با این ساختار نیازی به تبدیل سطح امپدانس در طول خط انتقال ندارد. فرایند طراحی این نوع فیلتر ساده است و قابلیت تحقق در ساختار فشرده را دارد. این نوع فیلتر تغییرات نسبتا بالای امپدانس استاب های رزونانسی نسبت به خط انتقال اصلی برای برآورده کردن مشخصات پاسخ فرکانسی دارد که می‌تواند با توجه به مشخصات موجبری گرافین و انتخاب صحیح امپدانس مشخصه خط اصلی به نحو مطلوب تنظیم شود، برای پهنای باندهای باریک، این تغییرات بسیار زیاد است، بنابراین تحقق فیلتر دشوار است.

در ابتدا، ما اثر ناپیوستگی انتهای خط مدار باز نانونوار گرافین را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهیم و سپس طراحی و شبیه سازی فیلتر میانگذر با استفاده از استاب های مدار باز ارائه می‌شود. در مرحله بعد، خاصیت قابل تنظیم فیلتر میان گذر با بهره گیری از ویژگی فوق العاده ساختار گرافنی به صورت اعمال بایاس میدان الکتریکی بر روی سطح گرافین و ایجاد پتانسیل شیمیایی متغیر، بدست می‌آید.

۲- بررسی اثر انتهایی خط مدار باز GNR

خط انتقال مدار باز از عناصر رایجی محسوب می‌شود که برای طراحی برخی از المان های اساسی در سیستم های تراهرتز، مانند فیلترها یا آنتن‌ها و غیره استفاده می‌شود. در این بخش، بررسی و جبران اثر انتهایی خط انتقال مدار باز GNR نشان داده شده در شکل (۱-الف) انجام می‌شود. شکل (۱-ب) ساختار پیشنهادی تنظیم بایاس میدان الکتریکی روی سطح گرافین با استفاده از گیت های ولتاژ را ارائه می‌کند. در شکل (۱-الف)، w عرض خط، h ارتفاع زیرلایه با $\epsilon_r=3.9$ است. همان طور که پیش بینی می‌شود، اثر پراکندگی میدان الکتریکی انتهای خط باید قابل توجه باشد. این اثر انتهایی خط مدار باز را همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است می‌توان به عنوان یک خط انتقال با طول L_{eo} تعریف کرد و به خط انتقال اصلی اضافه کرد به طوری که تمام پارامترهای انتشار خط انتقال اصلی را شامل باشد.

به منظور درک اثر پراکندگی لبه انتهایی خط مدار باز، فاز بازگشتی برای یک خط مدار باز با طول $\lambda/4 = 456$ نانومتر در فرکانس 5THz شبیه سازی شده و در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فاز ضریب بازتاب دریافتی ۱۸۰ درجه نیست که در نتیجه فرکانس رزونانس خط مدار باز در فرکانس مربوطه تنظیم نمی‌شود. با توجه به شکل (۳)، رزوناتور را می‌توان در فرکانس مورد نظر با کاهش طول خط به اندازه $\Delta L = L_{eo} = 47\text{nm}$ ، در فاز مورد نظر برای رزونانس تنظیم کرد.

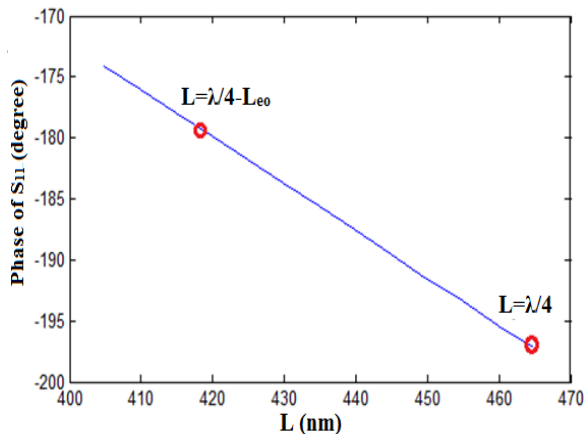
به منظور تعیین طول اضافی اثر انتهایی، خط مدار باز با یک طول الکتریکی خاص انتخاب می‌شود و فاز ضرایب بازتابی با استفاده از شبیه ساز تمام موج بدست می‌آید. بعد، به منظور تعیین طول L_{eo} ، معادله تغییر فاز زیر استفاده می‌شود مرجع:

گرافین به عنوان یک ماده دو بعدی منحصر به فرد، ویژگی های کوانتومی و الکترومغناطیسی جالب در باند تراهرتز و نوری نشان می‌دهد که خواص آن را از هادی‌ها و نیمه هادی‌ها متمایز می‌کند [۱-۴]. یکی از مهمترین خواص الکترومغناطیسی گرافین رسانندگی الکتریکی آن است که با استفاده از میدان های الکتریکی و مغناطیسی تغییر می‌یابد [۵]. این ویژگی منجر به طراحی مدارهای کنترل شونده، به ویژه در باند تراهرتز، با تغییر علامت بخش موهومی رسانندگی الکتریکی می‌شود [۶]. از ویژگی مهم موجبرهای گرافین، که آن را به عنوان یک گزینه منحصر به فرد برای استفاده در ادوات پلاسمونیک معرفی می‌کند، انتشار موج با ضریب شاخص بسیار بالاتر و تلفات کمتر نسبت به هادی معمول فلز در تراهرتز و فرکانس های نوری است [۷].

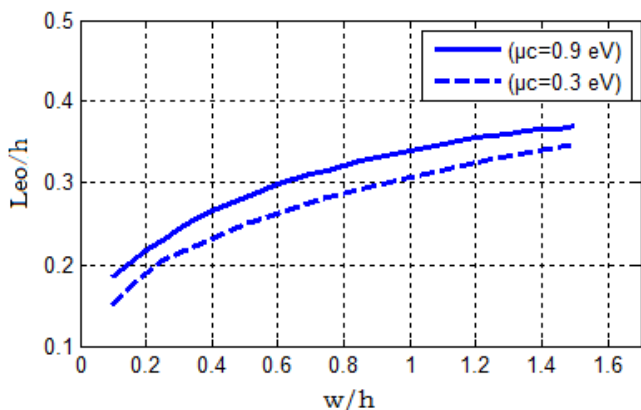
ادوات پلاسمونیک غیر فعال و فعال مبتنی بر گرافین در باند تراهرتز، از جمله تقویت کننده [۸]، سوئیچ [۹]، آرایه انعکاسی [۱۰]، کوپلر [۱۱]، و تضعیف کننده [۱۲] طراحی و بررسی شده است. در میان این عناصر، فیلترها نقش حیاتی در تحقق سیستم‌های تراهرتز ایفا می‌کنند. در این راستا، فیلترهای میان گذر و میان نگذر با قرار دادن رزوناتور های (GSR (Graphene Nanoribbon و GSR (graphene Split Ring) در ساختار های کوپلینگ سری و موازی ارائه شده که با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافین، جهت گیری GSR و همچنین فاصله بین دو المان، توانایی تنظیم مشخصات فیلتر در باند فرکانسی را دارا است. [۱۳] همچنین روشی برای تحلیل و طراحی فیلترهای پایین گذر مبتنی بر گرافین در باند تراهرتز با ساختار امپدانس پله ای ارائه می‌شود که شامل المان های امپدانس بالا و پایین در امتداد خط انتقال اصلی می‌باشد. همچنین مسائل پیاده سازی این ساختار مورد بررسی و توصیف قرار گرفته است [۱۴]. فیلتر دیگری با قرار دادن شکل سریاز رزوناتورهای نانونوار گرافنی در طول خط انتقال، طراحی شده است و فیلتر نوع میان گذر با کوپلینگ موج پلاسمونیک در یک فرکانس رزونانسی خاص استخراج شده است [۱۵].

در این مقاله، طراحی و شبیه سازی فیلتر میان گذر مبتنی بر گرافین با استفاده از استاب های مدار باز ارائه می‌شود. همچنین اثر ناپیوستگی انتهای خط مدار باز در قالب یک طول اضافی افزوده شده به انتهای خط بررسی و اثر آن در طراحی و شبیه سازی فیلتر میان گذر در نظر گرفته می‌شود.

این روش طراحی در توسعه فیلترهای میان گذر با ویژگی‌های مورد نظر، از جمله فرکانس مرکزی، پهنای باند نسبی (FBW)، انتخاب کنندگی فرکانس و پاسخ فرکانسی تخت یا ریپل دار ارائه می‌شود. در تحقق این فیلترها، استاب های مدار باز برای انتقال موج پلاسمونیک در باند فرکانس وسیع ($FBW > 10\%$) مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در مقایسه با رزوناتورهای کوپلینگ موج استفاده شده برای تحقق بیشتر انواع فیلترهای قبلی گرافنی [۱۶، ۱۷] دارای پهنای باند بالا و

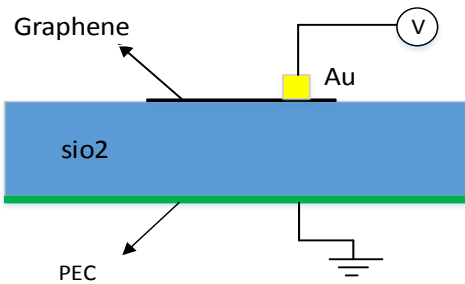
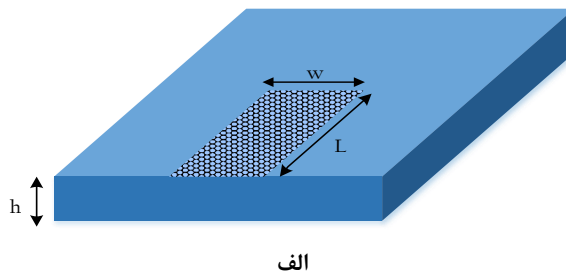


شکل (۳): فاز انتقال مدار باز با تغییر طول خط GNR
 ($w/h=0.25$, $\mu_c=0.7$ eV, $T=300$ K, $\tau=0.25$ ps)

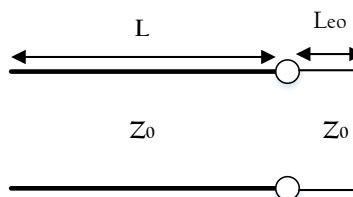


شکل (۴): مقادیر L_{eo} بدست آمده برای گرافین تک لایه با $\tau = 0.5$ ps, $T = 300$ K, $h=200$ nm در فرکانس ۵ THz

$$\beta L + \beta L_{eo} = -\{\angle(S_{11})\}/2 \quad (1)$$



شکل (۱-الف): خط انتقال مدار باز GNR (ب) طرح ساختار تنظیمی
 بایاس میدان الکتریکی بر سطح گرافین



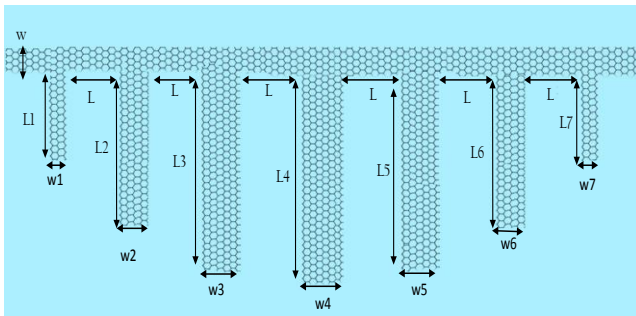
شکل (۲): ناپیوستگی خط مدار باز با اعمال یک طول اضافی به انتهای خط

با توجه به رابطه بالا مقادیر L_{eo} با شبیه سازی عددی برای زیرلایه SiO_2 در فرکانس ۵ تراهرتز و برای طیف پارامتری عرض گرافین از ۲۰ نانومتر تا ۳۰۰ نانومتر، ارتفاع زیرلایه ۲۰۰ نانومتر، پتانسیل شیمیایی گرافین ۰.۳ eV و ۰.۹ eV با $T=300$ K, $\tau=0.5$ ps و تک لایه گرافین در شکل (۴) بدست آمده است. در این رابطه مقادیر ثابت فاز و فاز S_{11} به صورت تمام موج جایگذاری می شوند. مقادیر بدست آمده نشان می دهد که با افزایش عرض نوار گرافینی و افزایش پتانسیل الکتریکی مقادیر L_{eo} افزایش می یابد که این با رفتار مبنی بر تراکم کمتر موج بر روی نانونوار گرافینی با افزایش این دو پارامتر و در نتیجه خاصیت پاشنده بودن بیشتر موج در انتهای خط، مطابق است.

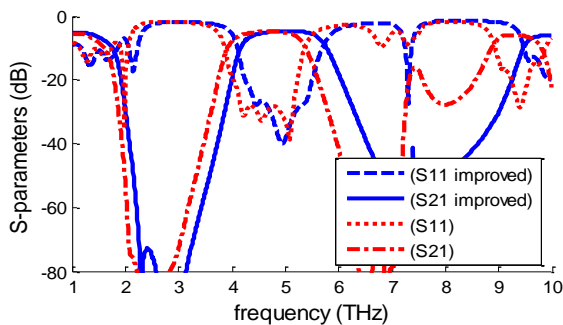
۳- طراحی و شبیه سازی فیلتر میان گذر

فیلتر از اجزای اصلی هر سیستم مخابراتی است [۱۸، ۱۹]. در این بخش ما فیلتر میان گذر مبتنی بر گرافین را در باند تراهرتز با استفاده از رزوناتورهای ربع طول موج مدار باز طراحی و شبیه سازی می کنیم. همچنین تأثیر انتهای خط مدار مدار باز در طراحی و شبیه سازی این نوع فیلتر وارد و بررسی می شود. با توجه به [۲۰]، استاب های ربع طول موج اتصال کوتاه در شکل مدارهای رزونانس موازی کار می کنند، بنابراین ما می توانیم این استاب ها را به صورت موازی با خط انتقال به منظور تحقق فیلترهای میانگذر استفاده کنیم. شکل کلی و ساختار موجبری این نوع فیلتر در شکل (۵) تعریف شده است، که در آن $\theta = \pi/2$ است. طول استاب های اتصال کوتاه و فاصله بین آنها برابر $\lambda/4$ در فرکانس قطع ω_0 است. در مرحله بعد، برای تحقق فیلتر میان گذر، امپدانس مشخصه هر یک استاب ها طبق رابطه ۲ بدست می آید.

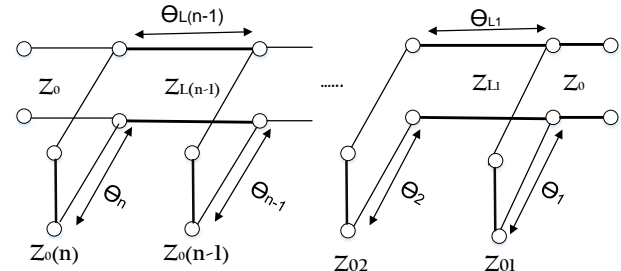
به منظور کاهش انحراف فرکانس مرکزی، طول نهایی خط مدار باز ربع طول موج باید به اندازه $2L_{e0}$ کاهش یابد. شکل (۷) پاسخ فرکانسی فیلتر میان گذر را با اعمال و بدون اثر ناپیوستگی مدار باز در باند تراهرتز نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، پاسخ فرکانسی فیلتر در غیاب اثر ناپیوستگی دارای فرکانس مرکزی 4.7THz است که نشان-دهنده تغییر 0.3THz نسبت به فرکانس طراحی است. با در نظر گرفتن اثر ناپیوستگی، پاسخ فرکانسی در فرکانس مرکزی 5THz تنظیم می‌شود. پهنای باند نسبی 7dB فیلتر در باند تراهرتز حدود 30% با فرکانس مرکزی 5THz بوده و در نتیجه پهنای باند وسیعی در مقایسه با نمونه های ارائه شده [۱۶، ۱۴] نشان می‌دهد. همچنین نشان-دهنده نرخ انتخاب فرکانسی خوب در نواحی گذار فرکانسی با کمترین تلفات بازگشتی حدود 30dB در باند گذر است. سطح افت عبوری فیلتر در فرکانس مرکزی حدود 4dB است، که نشان‌دهنده تلفات رضایت بخشی در مقایسه با فیلترهای پهن باند توسعه یافته است که اکثر آنها در قسمت پایین‌بند تراهرتز عمل می‌کنند [۲۲، ۲۱]. در این بخش، با تغییر پتانسیل شیمیایی با استفاده از اعمال میدان الکتریکی قابل تنظیم روی سطح گرافن، می‌توان فیلتر میان گذر قابل تنظیم را در باند تراهرتز بدست آورد. همانطور که از شکل (۸) دیده می‌شود، فرکانس مرکزی فیلتر، حدود تغییرات نسبی 25% درصد در باند تراهرتز با تغییر پتانسیل شیمیایی 0.9eV به 0.5eV نشان می‌دهد. منحنی تاخیر گروه فیلتر در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فیلتر میان گذر در باند عبور بین 4.25THz تا 5.75THz تاخیر تقریباً ثابت در حدود 1.25psec دارد.



شکل (۶): ساختار فیلتر میان گذر در فرکانس مرکزی 5THz



شکل (۷): پاسخ فرکانسی فیلتر میان گذر با اعمال و بدون اعمال اثر ناپیوستگی خط مدار باز



شکل (۵): مدل معادل خط انتقال فیلتر میان گذر با استفاده از استاب‌های اتصال کوتاه

$$Z_{0n} = \frac{\pi Z_0 \Delta}{4g_n} \quad (2)$$

که در آن g_n مقادیر نرمالیزه فیلتر پایین گذر باند پایه و Δ پهنای باند نسبی فیلتر میان گذر و Z_0 امپدانس مشخصه خط اصلی است. با توجه به مراحل طراحی بخش قبل، فیلتر میان گذر با مشخصات فرکانس رزونانس 5THz ، پهنای باند نسبی 0.5 ، درجه 7 و بدون ریپل در باند عبور (فیلتر نوع باترورث) طراحی، شبیه سازی خواهیم کرد. مشخصات گرافین $T = 300\text{K}$ ، $\mu c = 0.9\text{eV}$ ، $\tau = 1\text{ps}$ ، تک لایه‌ای گرافن و زیرلایه SiO_2 با ضخامت 200 نانومتر انتخاب شده است. اول، برای طراحی فیلتر میان گذر با انتخاب امپدانس $Z_0 = 1600\Omega$ امپدانس مشخصه به همراه پارامترهای فیزیکی بدست آمده برای هر یک از استاب‌های اتصال کوتاه بر اساس جدول ۱ بدست می‌آید. در ضمن، عرض خط انتقال اصلی $w = 70\text{nm}$ و طول خطوط انتقال میانی آن $L = \lambda / 4 = 600$ نانومتر است.

جدول (۱): مشخصات استاب‌های اتصال کوتاه فیلتر میان گذر

n	$Z_{0n}(\Omega)$	$w_n(\text{nm})$	$L_n(\text{nm})$
۱	۲۸۲۰	۲۰	۷۵۶
۲	۱۰۰۰	۱۲۸	۱۴۴۱
۳	۷۰۰	۲۱۵	۱۶۵۱
۴	۶۳۰	۲۳۵	۱۶۸۷
۵	۷۰۰	۲۱۵	۱۶۵۱
۶	۱۰۰۰	۱۲۸	۱۴۴۱
۷	۲۸۲۰	۲۰	۷۵۶

از آنجایی که پیاده سازی اتصال کوتاه انتها با استاب در این فیلتر دشوارتر از حالت مدار باز است، با توجه به اینکه خط انتقال مدار باز با طول $\lambda / 4$ در فرکانس رزونانس به صورت یک اتصال کوتاه عمل می‌کند، بهتر است شبیه سازی فیلتر میان گذر با اضافه کردن خط انتقال ربع طول موج به انتهای هر یک از استاب‌های رزونانسی با حفظ مشخصات مربوطه انجام شود.

شکل (۶) ساختار فیلتر میان گذر را با پارامترهای فیزیکی تعریف شده آن نشان می‌دهد. با توجه به اثر پاشندگی انتهای خط مدار باز، تعیین مقادیر L_{e0} مورد نیاز برای ایجاد شرایط رزونانس درست ضروری است. طول معادل اثر انتهایی استاب‌های مدار باز بدست آمده در بخش دوم برابر است با $L_{e01} = L_{e07} = 35\text{nm}$ ، $L_{e02} = L_{e06} = 61\text{nm}$

[5] Yao, Y. "Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas," Nano letters, Vol.13, no. 3, pp.1257-1264, 2013.

[6] Danaeifar, M., Granpayeh, N., Mohammadi, A., Setayesh, A., "Graphene-based tunable terahertz and infrared band-pass filter," Appl. Opt., Vol. 52, no. 22, pp.E68-E72, 2013.

[7] Christensen, J., et al., "Graphene plasmon waveguiding and hybridization in individual and paired nanoribbons," ACS Nano, Vol.6, no. 1, pp. 431-440, 2011.

[8] F. Rana, "Graphene terahertz plasmon oscillators," IEEE Trans. Nanotechnol. Vol. 7, no. 1, pp. 91-99, 2008.

[9] J. Gomez-Diaz, J. Perruisseau-Carrier, "Graphene-based plasmonic switches at near infrared frequencies," Opt. Express, Vol. 21, no. 13, pp. 15490-15504, 2013.

[10] E. Carrasco, J. Perruisseau-Carrier, "Tunable graphene reflective cells for THz reflectarrays and generalized law of reflection," Appl. Phys. Lett., vol. 102, no. 10, pp. 104103-1-104103-4, 2013.

[11] Y. Wu, M. Qu, Y. Liu, Z. Ghassemlooy, A Broadband Graphene-Based THz Coupler with Wide-Range Tunable Power-Dividing Ratios," Plasmonics, vol.12, no. 5, pp. 1487-1492, 2017.

[12] H. Jian-rong, L. Jiu-sheng, Q. Guo-hua, "Graphene-Based Waveguide Terahertz Wave Attenuator," Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. vol. 37, no. 7, pp. 668-675, 2016.

[13] Y. Gao, G. Ren, B. Zhu, L. Huang, H. Li, B. Yin, S. Jian, "Tunable plasmonic filter based on graphene split-ring," Plasmonics. vol. 11, no. 1, pp. 291-296, 2016.

[14] D. Correas-Serrano, J.S. Gomez-Diaz, J. Perruisseau-Carrier, et al. "Graphene-Based Plasmonic Tunable Low-Pass Filters in the Terahertz Band," IEEE Trans. Nano., vol. 13, no. 6, pp. 1145-1153, 2014.

[15] H. Zhuang, F. Kong, K. Li, S. Sheng. "Plasmonic bandpass filter based on graphene nanoribbon," Appl. Opt., vol. 54, pp. 2558-2564, 2015.

[16] S. Sheng, K. Li, F. Kong, H. Zhuang, "Analysis of a tunable band-pass plasmonic filter based on graphene nanodisk resonator. Optics Communications. 336, pp. 189-196, 2015.

[17] J. Christensen, Graphene plasmon waveguiding and hybridization in individual and paired nanoribbons," ACS Nano, vol. 6, no. 1, pp. 431-44, 2011.

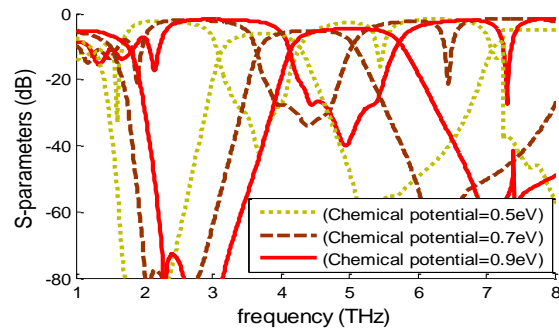
[18] A. Gholipour and K. Mafinezhad, "Design and Simulation of a Clamped-Clamped Micromechanical Beam AM Frequency Mixer-Filter," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 14, no.4, pp. 15-21, 2018.

[19] H. Javid, A. N. Banai, M. Fardman, J. Schubert M. Banzet, "Design and fabrication of a superconductive band pass filter," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 6, no.2, pp. 19-24, 2010.

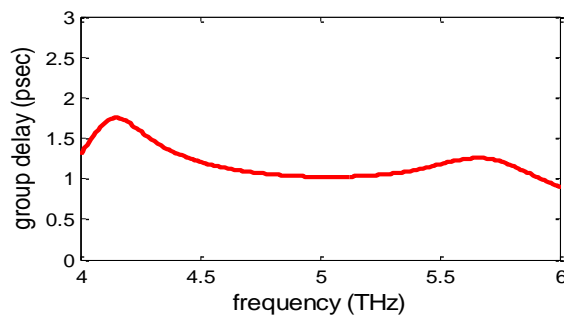
[20] D. M. Pozar, "Microwave engineering," Hoboken, NJ: J. Wiley, 2005.

[21] Y. J. Chiang, C. S. Yang, Y. H. Yang, C. L. Pan, T. J. Yen, "An ultrabroad terahertz bandpass filter based on multiple-resonance excitation of a composite metamaterial," Applied Physics Letters. vol. 99, no. 19, page 191909, 2011.

[22] L. Liang, et al, A flexible wideband bandpass terahertz filter using multi-layer metamaterials," Applied Physics B. vol. 113, no. 2, pp. 285-290, 2013.



شکل (۸): پاسخ فرکانسی فیلتر میان گذر با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافین از ۰.۵ eV تا ۰.۹ eV.



شکل (۹): تأخیر گروه فیلتر میان گذر در باند تراهرتز بر حسب بیکواتیبه

۴- نتیجه گیری

در این مقاله فیلتر میان گذر پهن باند قابل تنظیم در باند تراهرتز بر اساس ساختار استاب‌های رزونانسی طراحی و شبیه سازی شد. فرکانس مرکزی فیلتر میان گذر، جابجایی فرکانسی 0.3 THz در مقایسه با فرکانس طراحی را نشان می‌دهد، که با استفاده از اعمال اثر ناپیوستگی مدار باز نانونوار گرافنی که به صورت عددی استخراج شده است، فرکانس مرکزی در 5 THz با مشخصات مورد نظر تثبیت می‌شود. پهنای باند نسبی فیلتر طراحی شده حدود ۳۰٪ است و فرکانس مرکزی فیلتر، جابجایی نسبی ۲۵٪ با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافین از 0.5 eV تا 0.9 eV نشان می‌دهد. با توجه به ساختار فشرده و طراحی ساده، این نوع فیلترها می‌توانند در ساخت ادوات پلاسمونیک باند وسیع آینده در باند تراهرتز مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

[1] Abajo, G., Javier, F., "Graphene plasmonics: challenges and opportunities," ACS Photonics, vol. 1, no. 3, pp.135-152, 2014.

[2] Fengnian, X., et al., "Two-dimensional material nanophotonics," Nature Photonics, Vol. 8, no. 12, pp.899-907, 2014.

[3] Vakil, A., Engheta, N., "Transformation optics using graphene, PhD thesis," University of Pennsylvania, 2011.

[4] Low, T., Avouris, P., "Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications," ACS Nano, pp. 1086-1101, 2014.

