

# نقش گرتینگ و تنظیم الکترواپتیکی سویچ های نوری با ولتاژدهی به لایه گرافن در افزایش پهنای باند

عبدالکریم افروزه<sup>۱</sup>

۱- استادیار - دانشکده مهندسی برق - مجتمع آموزش عالی لارستان - لار - ایران  
[afroozeh@lar.ac.ir](mailto:afroozeh@lar.ac.ir)

**چکیده:** جهت بهبود پهنای باند در سوئیچ های الکترواپتیکی، نقش گرتینگ مورد ارزیابی قرار گرفته است. ساختار پیشنهادی مبتنی بر یک میکرو حلقه و رزوناتور گرافنی می باشد. تنظیم و کنترل پهنای باند با استفاده از کنترل هدایت سطحی گرافن صورت گرفته است. مدل پیشنهادی با استفاده از روش حل عددی مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته است. با کنترل تزویج بین مدهای کاواک از طریق تغییر مشخصات هندسی و اعمال پتانسیل شیمیایی بیشترین پهنای باند حاصل شده از ساختار بدست آمده است. همانطور که نتایج نشان می دهد، از ساختار پیشنهادی می توانیم در سوئیچ های تنظیم پذیر پهن باند استفاده کرد. با در نظر گرفتن کنترل هدایت سطحی گرافن از طریق پتانسیل شیمیایی بین ۰,۴ تا ۰,۶ الکترون ولت نشان داده شده است که پهنای باند به اندازه ۱,۶ برابر کارهای قبل یعنی ۸ تراهرتز قابل دستیابی هست. از طرفی با کنترل تعداد لایه های گرافن نشان داده می شود که حداکثر پهنای باند برای گرافن تک لایه امکان پذیر است. در نهایت جهت دستیابی به بیشترین پهنای باند در ساختار پیشنهادی اثر گرتینگ بررسی شد. با در نظر گرفتن پتانسیل شیمیایی ۰,۴ الکترون ولت بالاترین پهنای باند یعنی ۱۰ تراهرتز برای ساختار پیشنهادی بدست خواهد آمد.

**واژه های کلیدی:** سویچ نوری، مقیاس پذیری، میکرو حلقه رزوناتور، گرافن

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.3.1132

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱

نام نویسنده: دکتر عبدالکریم افروزه

نشانی نویسنده: مسئول: ایران - لار - مجتمع آموزش عالی لارستان - دانشکده مهندسی برق

گرافن می توان به یک سوئیچ تنظیم پذیر با پهنای باند بالا دست پیدا کرد. بر همین اساس از گرافن در کاربردهای بسیار متنوعی مانند مدولاتورها در گروه های تحقیقاتی استفاده می شود [۶].

یکی از مهمترین المان ها، سوئیچ های نوری هستند. سوئیچ های نوری مبتنی بر گرافن با توجه به ویژگی های منحصر به فرد آن مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند. همچنین یکی از پارامترهای مهم سوئیچ ها، قابلیت افزایش تعداد ورودی و خروجی می باشد. بر همین اساس ساختارهای مبتنی بر میکرو حلقه ها مورد توجه می باشند [۷]. علاوه بر آن از ساختارهای میکرو حلقه در ساختارهای پلاسمونی میتوان استفاده کرد [۸-۹].

در بسیاری از این سوئیچ ها تعداد ورودی و خروجی افزایش پیدا کرده است و امکان استفاده از سوئیچ برای کاربردهای تنظیم پذیری فراهم شده است [۱۰-۱۲]. در این زمینه گروه تحقیقاتی یانگ، یک سوئیچ نوری  $2 \times 2$  پیشنهاد دادند. در این ساختار با در نظر گرفتن شعاع حلقه  $5.1$  میکرو متری و اعمال ولتاژ  $2.38$  ولت، امکان سوئیچینگ فراهم خواهد شد [۱۱]. در ساختار دیگری گروه نیکولاس یک سوئیچ نوری  $4 \times 4$  پیشنهاد دادند. آنها توانستند به پهنای باند  $38.5$  گیگاهرتز دست پیدا کنند [۱۲]. البته پیش از این نیز تلاشهای بسیاری در ساختارهای سیلیکونی جهت دستیابی به حداکثر پهنای باند توسط گروه های تحقیقاتی شده است [۱۳-۱۶]. برای مثال گروه سوتیروس یک سوئیچ نوری  $2 \times 2$  پیشنهاد دادند. در ساختار پیشنهادی آنها با در نظر گرفتن شعاع حلقه  $5.5$  میکرومتر امکان دستیابی به پهنای باند  $10$  برابر کار قبلی فراهم گردید [۱۶]. در همین زمینه اخیرا سوئیچ های نوری مبتنی بر موادی همچون لیتیوم نای او بی [۱۷]، اکسید وانادیوم [۱۸-۱۹] و نانوذرات فلز نیتريد [۲۰] جهت بهبود پهنای باند پیشنهاد شده اند. اخیرا نیز استفاده از گرافن جهت بهبود پهنای باند در یک ساختار ماخ زندری با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی کر معرفی شده است [۲۱]. در ادامه این کار ارزشمند، دسترسی به سوئیچ با پهنای باند بالا و ابعاد کوچک مدنظر خواهد بود. از طرفی بررسی اثر تعداد لایه های گرافن نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد.

بنابراین، در این پژوهش به بررسی مشخصه های طیف انتقال و کنترل پهنای باند با استفاده از تغییر ویژگی های هندسی ساختار و همچنین اعمال میدان الکتریکی پرداخته شده است. در ابتدا، ساختار میکرو حلقه پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می گیرد. جهت تحلیل ساختار از روش حل عددی استفاده شده است. تحلیل ها جهت دستیابی به کیفیت تزویج بالاتر بین حلقه و نور ورودی انجام می شود. پس از پیدا کردن بهترین شعاع برای حلقه، اثر پتانسیل شیمیایی و تعداد لایه های گرافن به ترتیب مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتایج اخیر نشان می دهد با اعمال خمش بر روی ساختار به همراه استفاده از گرینگ امکان دستیابی به پهنای باند بیشتر فراهم می شود.

شبکه های مخابراتی و کامپیوتری به سرعت در حال پیشرفت هستند و پهنای باند شبکه های دیجیتالی و اینترنتی رو به افزایش است [۱]. نیازهای مختلف جدید امروز، اینترنت و شبکه های مخابراتی را تحت تأثیر قرار داده است. نیاز به دستیابی به سرعت انتقال اطلاعات بالا از جمله سرویس هایی است که بر روند پیشرفت اینترنت تأثیر گذاشته است. از علل دیگری که بر رشد اینترنت تأثیر گذاشته است تکامل سریع نیمه هادی ها و تکنولوژی های نوری است. ترکیب قطعات نوری و الکترونیکی باعث افزایش قابلیت های سیستم ها و شبکه ها شده است. با بکار گیری لیزر و فیبر نوری در ارتباطات مخابراتی و با توجه به پهنای باند فیبر نوری نیاز به استفاده از شبکه ها و سیستم هایی با ظرفیت و پهنای باند بالا افزایش یافت [۲]. تجهیزات زیادی در ساختارهای شبکه و سیستم ها استفاده می شود که تحت تأثیر این افزایش پهنای باند و سرعت قرار می گیرند. سوئیچ یکی از تجهیزاتی است که در سیستم ها و شبکه ها استفاده می شود. سوئیچ در ساختارهای مختلف الکتریکی عمل کلیدزنی را انجام میدهد. در کاربردهای مخابرات نوری، سوئیچ نوری سیگنال ها را در فیبرهای نوری با مدارهای مجتمع نوری از یک مدار (کانال) به مدار دیگر کلید می زند یا اصطلاحا سوئیچ می کند. سوئیچ نوری همانند سایر تجهیزات نوری برای افزایش قابلیت استفاده از ظرفیت انتقال اطلاعات فیبر نوری در حال تکامل و پیشرفت است. موضوع این مقاله شامل طراحی و شبیه سازی فیلترهای میکرو حلقه رزوناتور و سوئیچ های نوری با تنظیم مشخصات اپتیکی گرافن است.

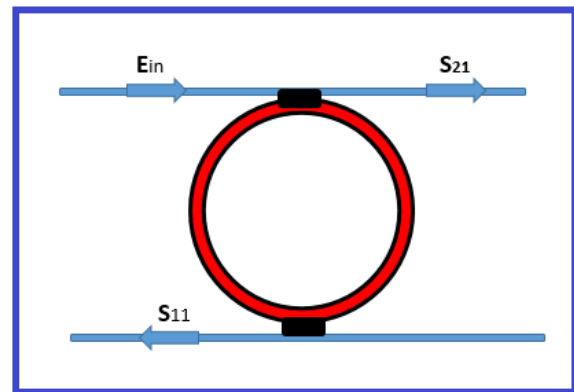
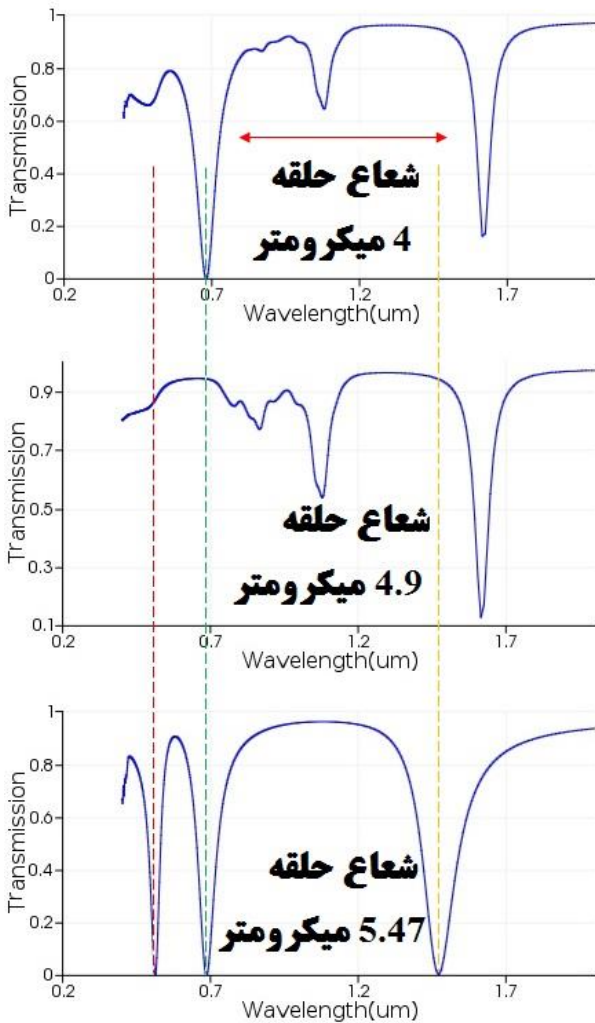
سوئیچ نوری برای اولین بار در دهه  $1970$  مطرح شد و کاربرد آن در دهه  $1980$  بعد از اینکه از فیبر نوری برای انتقال اطلاعات استفاده شد، افزایش یافت. از آغاز دهه  $1990$  تاکنون تلاش های قابل توجهی برای سوئیچینگ نوری صورت گرفته است که برخی از مهم ترین مطالعات مرتبط با این مقاله در ادامه آمده است.

سوئیچ های نوری بصورت کلی بر اساس دو نوع ساختار طراحی می شوند: فضای آزاد و موجبری. در هر یک از این سوئیچ های مواد متنوعی جهت بهبود پارامترهای سوئیچ مانند پهنای باند استفاده شده است. ساختارهای متداول مبتنی بر مواد غیر تنظیم پذیر مانند سیلیکون پهنای باند ذاتی کمی را خواهند داشت [۳-۴]. برای همین منظور امروزه بیشتر از مواد دوبعدی هوشمند استفاده می شود. از جمله این مواد گرافن است.

گرافن یک ماده دوبعدی با ساختار کریستالی لانه زنبوری می باشد. از جمله ویژگی های مهم این ماده تنظیم پذیر بودن هدایت سطحی نوری آن در محدوده فرکانس های تراهرتز می باشد. در این ماده با کنترل میزان دوپینگ و همچنین پتانسیل شیمیایی از طریق یک بایاس خارجی امکان کنترل ضریب دی الکتریک نوری فراهم می شود [۵]. همچنین با در نظر گرفتن انتقال بین باندی و درون باندی در

## ۲- ساختار اولیه میکرو حلقه رزونانسی

برای طراحی سوییچ های نوری ابتدا ساختار فیلترهای میکرو حلقه رزونانسی پیاده سازی شده و خروجی های پورت های عبور و خروج مورد بررسی قرار می گیرند. در این ساختار میزان خروجی نور با توجه به شعاع حلقه رزونانسی تعیین می شود. بنابراین ابتدا، ساختار میکرو حلقه موجبرهایی با جنس هسته سیلیکون و پوشش سیلیکون دی اکسید با عرض  $W=0.8/0.8$ ، ارتفاع  $H=0.496$  و شعاع حلقه ۴ تا ۵.۴۷ میکرومتر بررسی شده است. ضریب شکست سیلیکون و سیلیکون دی اکسید به ترتیب ۳/۴۷ و ۱/۴۴ است. برای هر دو ماده از مدل پالیک استفاده شده است. شکل ۱ ساختار میکرو حلقه می باشد که  $S_{1,2}$  دراپ،  $S_{1,4}$  پورت و  $E_{in}$  نور ورودی می باشد.  $k_1$  و  $k_2$  ضریب کوپلینگ می باشد.



شکل (۱): ساختار پیشنهادی سوییچ میکرو حلقه

شکل (۲): نمودار انتقالی خروجی پورت با در نظر گرفتن شعاع میکرو حلقه الف) ۰.۴، ب) ۴.۹، ج) ۵/۴۷ میکرومتر

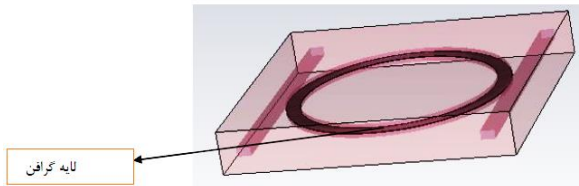
همانطور که نتایج نشان می دهد بهترین قطر برای ساختار پیشنهادی برابر با ۵.۴۷ میکرومتر انتخاب خواهد شد. در بخش بعد اثر بکارگیری پتانسیل شیمیایی و تعداد لایه های گرافن مورد ارزیابی دقیق قرار می گیرد.

## ۳- تنظیم پذیری سوییچ پیشنهادی

با در نظر گرفتن هدایت سطحی تنظیم پذیر گرافن امکان طراحی سوییچ تنظیم پذیر فراهم می شود. برای شبیه سازی ساختار از مدل پالیک برای سیلیکون و دی اکسید سیلیکون استفاده شده است. همچنین برای مدلسازی گرافن از مدل فالدکوسکی استفاده شده است. برای تنظیم طول موج رزونانس از لایه گرافن استفاده شده است. لایه گرافن ۰/۳۵ نانومتر ضخامت دارد. برای پتانسیل های شیمیایی مختلف این نمودار تغییر می کند. در نتیجه با اعمال پتانسیل های شیمیایی مختلفی گذردهای الکتریکی مختلفی بدست می آید که در

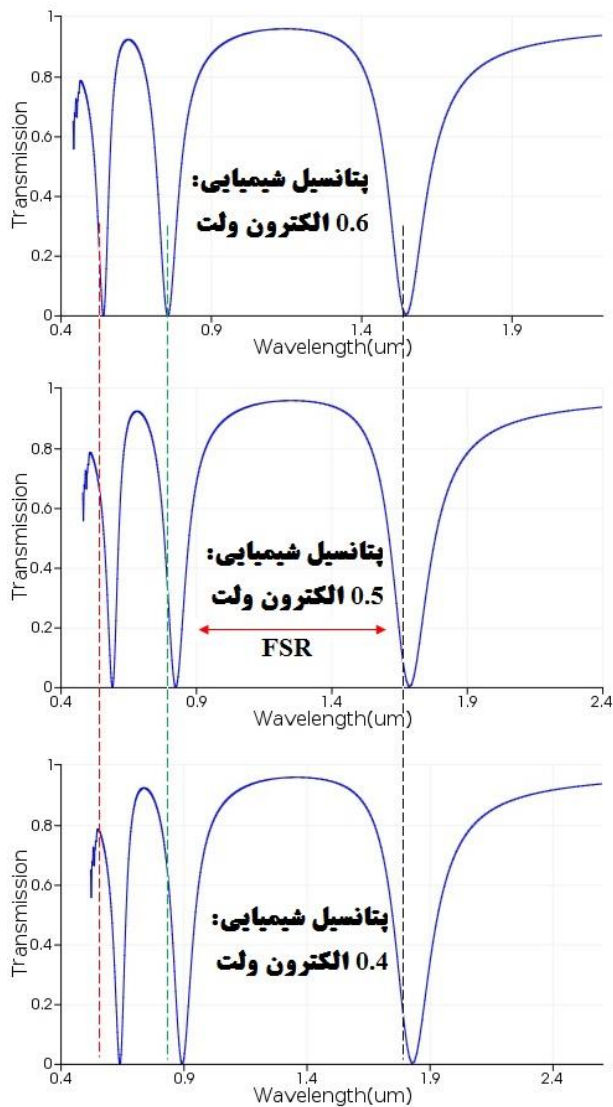
با افزایش شعاع رینگ رزونانسی تعداد رزونانسها در محدوده ی فرکانسی معینی افزایش می یابد که نشان دهنده ی افزایش طول موج های رزونانس و مدهای عبوری در ساختار میکرو حلقه است. شکل شماره ۲ نمودار خروجی جهت دستیابی به بهترین کوپلینگ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جهت تحلیل ساختار از روش حل عددی در نرم افزار CST استفاده شده است. همچنین نمایش نتایج از نرم افزار بدست آمده جهت بهبود کیفیت مجددا در نرم افزار لومریکال ارزیابی شده است. با توجه به نمودار خروجی پورت در ساختار پیشنهادی با افزایش شعاع حلقه اندازه محدوده طیفی آزاد (FSR) کاهش می یابد. لذا برای دستیابی به اندازه FSR مشخصی می توان با تغییر شعاع حلقه رزونانسی به آن دست یافت. از طرفی همانطور که نشان داده شده است در قطرهای کوچکتر از ۵.۴۷ میکرومتر رفتار رزونانسی صحیح نخواهد بود.



شکل (۴): ساختار سویچ میکرو حلقه رزونانسی با لایه گرافن در موجبر رینگ

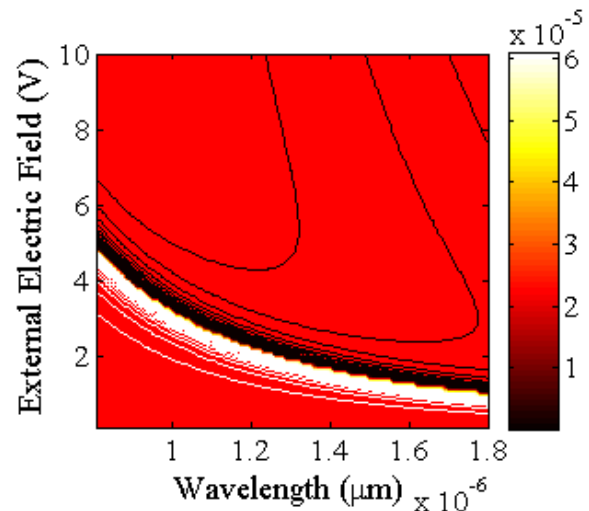
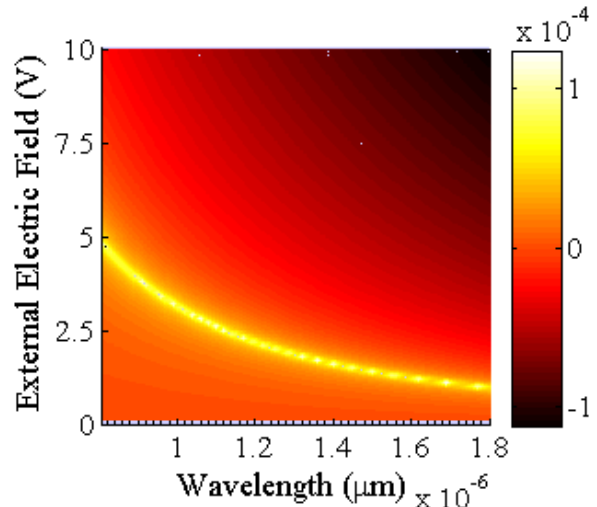
ابتدا لایه گرافن در ساختار با هسته سیلیکون قرار داده شده است. با اعمال ولتاژ مختلف به لایه گرافن و تغییر پتانسیل شیمیایی آن، نمودار خروجی به صورت شکل شماره ۵ بدست آمده است.



شکل (۵): نمودار انتقالی خروجی پورت سویچ با اعمال پتانسیل های ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴ الکترون ولت

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است برای ساختار مبتنی بر گرافن تک لایه، حداکثر پهنای باند بین این سه محدوده پتانسیل

تنظیم طول موج رزونانس از این تغییرات استفاده شده است. با در نظر گرفتن فرمول کوبو و محاسبه هدایت سطحی متغیر با ولتاژ در شکل ۳ بدست آمده است.



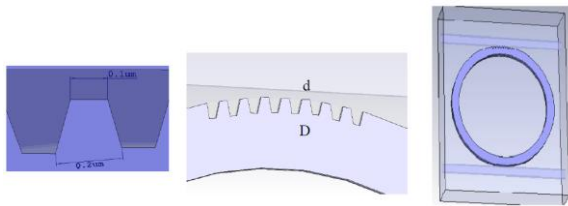
شکل (۳): محاسبه قسمت حقیقی و موهومی هدایت سطحی گرافن

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با کنترل ولتاژ بین ۰ تا ۱۰ ولت، پتانسیل شیمیایی گرافن کنترل شده و میزان هدایت سطحی تغییر می کند. با در نظر گرفتن این ویژگی جالب امکان کنترل سویچ فراهم می شود.

### ۳-۱- سویچ های میکرو حلقه رزونانسی

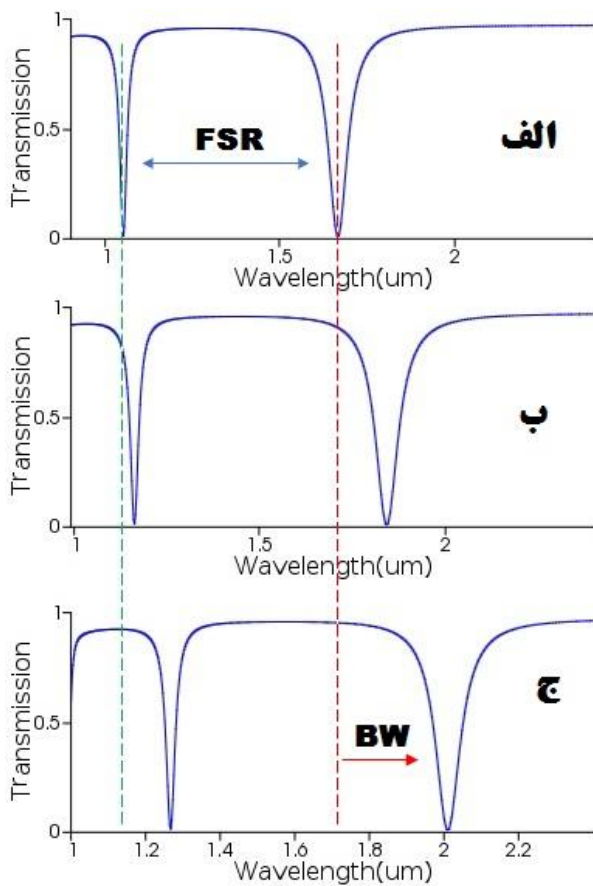
با قرار دادن گرافن در موجبر ساختار میکرو حلقه رزونانسی ضریب شکست موثر که حاصل از برآیند ضریب شکست هسته و گرافن است تغییر خواهد کرد و امکان تغییر در طول موج رزونانسی را فراهم می آورد. به همین منظور در ساختار فیلتر ادد دراپ شکل شماره ۴ لایه گرافن درون موجبر رینگ رزونانسی و برای تأثیرگذاری بیشتر در ضریب شکست موثر در مرکز هسته قرار داده شده است. شکل ۴ شماتیکی از این ساختار را نمایش می دهد.

گریتینگ‌ها با توجه به بررسی های انجام شده محاسبه شده است. شکل شماره ۸ نیز طیف های خروجی از پورت‌ها را نمایش می دهد.



شکل (۷): سویچ میکرو حلقه رزونانسی با گریتینگ هرمی

با ایجاد گریتینگ در دو طرف رینگ رزوناتور نمودار خروجی در طول موج های بالاتر با ضریب کیفیت بالاتر خواهد بود. با توجه به ساختار شکل ۷، مجددا نمودار انتقالی خروجی مورد محاسبه قرار گرفته است.

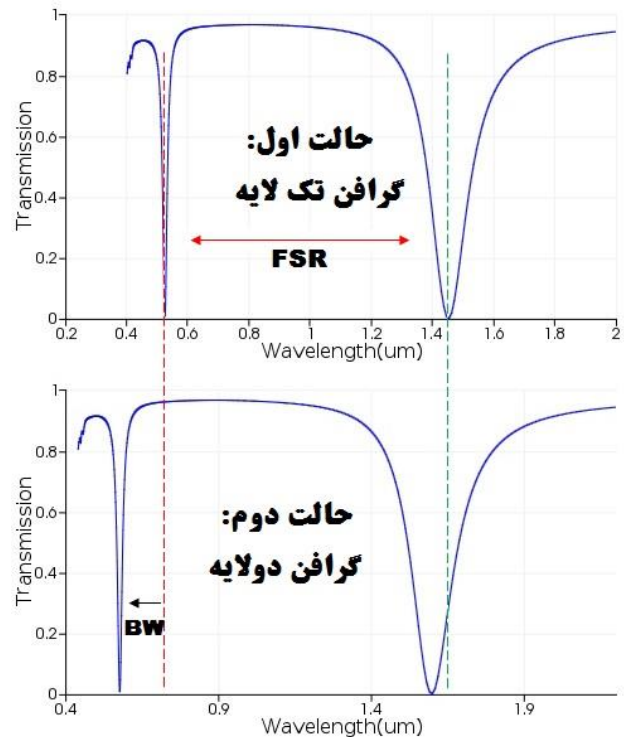


شکل (۸): نمودار انتقالی خروجی ابرای (الف) ۰٫۶ الکترون ولت (ب) ۰٫۵ الکترون ولت (ج) ۰٫۴ الکترون ولت

همانطور که نتایج نشان می دهد امکان دستیابی به پهنای باند بالاتر از ۱۰ تراهرتز در ساختار دوم فراهم شده است. این پهنای باند دو برابر کارهای قبل می باشد. بهترین نتیجه برای پتانسیل شیمیایی ۰٫۴ الکترون بدست آمده است.

شیمیایی برابر با ۸ تراهرتز خواهد شد. که نسبت به ساختارهای قبل در حدود ۱٫۶ برابر افزایش پهنای باند مشاهده می شود [۲۲].

جهت بررسی دقیق تر ساختار پیشنهادی، اثر تعداد لایه های گرافن بر روی پهنای باند مورد ارزیابی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است با در نظر گرفتن تعداد گرافن دولایه پهنای باند قابل دسترس توسط اعمال پتانسیل شیمیایی به کمتر از ۵ تراهرتز خواهد رسید. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که بهترین تعداد لایه برای گرفتن، یک لایه هست. البته از نقطه نظر ساخت دستیابی به گرافن تک لایه پیچیده خواهد بود.



شکل (۶): نمودار انتقالی خروجی برای (الف) تک لایه (ب) دولایه

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پهنای نمودار انتقالی برای طول موج های بالاتر کمی گسترده است و امکان تداخل بین حالت های مختلف اجتناب ناپذیر خواهد بود. برای رسیدن به تغییرات قابل قبول، شیفت مناسب طول موج و در نتیجه ضریب کاهشی مطلوب سویچینگ در خروجی های دراپ و عبور با ایجاد گریتینگ در سطح رینگ رزوناتور در ناحیه ی کوپلینگ و کنترل کوپلینگ توان از موجبر باس به رینگ رزوناتور سعی در افزایش تأثیرات ضریب شکست لایه گرافن و ایجاد تغییرات و شیفت بیشتر در نمودار خروجی ساختار میکرو حلقه رزوناتور است. بنابراین در شبیه سازی های انجام شده یک طرح گریتینگ بر روی موجبر رینگ اجرا شده و تغییرات نمودار خروجی در پورت ها نمایش داده شده است.

شکل شماره ۷ ساختار سویچ با گریتینگ هرمی را نمایش میدهد. اندازه گریت‌ها در قاعده هرم  $D=0/2$  میکرومتر و در بالای هرم  $d=0/1$  میکرومتر قرار داده شده است. اندازه فاصله، تعداد و عمق

- [6] M. Midrio, S. Boscolo, M. Moresco, M. Romagnoli, C. De Angelis, A. Locatelli, and A. D. Capobianco, "Graphene-assisted critically-coupled optical ring modulator," *Optical Society of America , Optics Express*, vol. 20, No. 21, 8 October 2012.
- [7] Akbari, Elnaz, et al. "Quality factor investigation by using trapezoidal subwavelength grating waveguide micro-ring resonator based on graphene." *Results in Physics* 10 (2018): 304-307.
- [8] L. Zhang, Zecen, et al. "Conversion between EIT and Fano spectra in a microring-Bragg grating coupled-resonator system." *Applied Physics Letters* 111.8 (2017): 081105.
- [9] Singh, Mandeep. "Modeling of Hybrid Plasmonic Ring Resonator Based on Dielectric Filled Subwavelength Metal Grating." *Plasmonics* 14.4 (2019): 915-920.
- [10] R. Ji, L. Yang, L. Zhang, Y. Tian, J. Ding, H. Chen, Y. Lu, P. Zhou, and W. Zhu, "Five-port optical router for photonic networks-on-chip," *Optics Express*, vol. 19, no. 21, pp. 20 258–20 268, Oct. 2011.

[۱۱] گل پیرا و بیورانی، " روشی جدید برای بهبود پایداری سیگنال کوچک و

تنظیم ولتاژ با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده "نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۶ شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸

- [12] N. Sherwood-Droz, H. Wang, L. Chen, B. G. Lee, A. Biberman, K. Bergman, and M. Lipson, "Optical  $4 \times 4$  hitless silicon router for optical networks-onchip(NoC)," *Optics Express*, vol. 16, no. 20, pp. 15 915–15 922, 2008.
- [13] Al. Biberman, H. L. R. Lira, K. Padmaraju, N. Ophir, J. Chan, M. Lipson, and K. Bergman, "Broadband silicon photonic electrooptic switch for photonic interconnection networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 8, pp. 504–506, Apr. 15. 2011.
- [14] L. Xu, W. Zhang, Q. Li, J. Chan, H. Lira, M. Lipson, and K. Bergman, "40-Gb/s DPSK data transmission through a silicon microring switch," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 6, pp. 473–475, March 15, 2012.
- [15] X. Luo, J. Song, S. Feng, A. W. Poon, T. Y. Liow, M. Yu, G. Q. Lo, and D. L. Kwong, "Silicon high-order coupled-microring-based electro-optical switches for on-chip optical interconnects," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 10, pp. 821–823, May 15, 2012.
- [16] S. Papaioannou, K. Vyrsokinos, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, K. Hassan, J. C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, S. I. Bozhevolnyi, A. Miliou, E. Kriezis, and N. Pleros, "A 320 Gb/s-throughput capable  $2 \times 2$  silicon-lasmonic router architecture for optical interconnects," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 21, pp. 3185–3195, Nov. 2011.
- [17] Thomaschewski, Martin, et al. "Plasmonic monolithic lithium niobate directional coupler switches." *Nature communications* 11.1 (2020): 1-6.
- [18] Chauhan, Diksha, Genene Tessema Mola, and Ram Prakash Dwivedi. "An ultra-compact plasmonic Modulator/Switch using VO2 and elasto-optic effect." *Optik* 201 (2020): 163531.
- [19] Moradiani, Fatemeh, et al. "High Extinction Ratio All-Optical Modulator Using a Vanadium-Dioxide Integrated Hybrid Plasmonic Waveguide." *Plasmonics* (2020): 1-10.
- [20] Xian, Yuehui, et al. "Refractory Plasmonic Metal Nitride Nanoparticles for Broadband Near-Infrared Optical Switches." *Laser & Photonics Reviews* 13.6 (2019): 1900029.
- [21] Armaghani, Sahar, Shiva Khani, and Mohammad Danaie. "Design of all-optical graphene switches based

نتایج نشان می دهد که افزایش شعاع فیلتر و افزایش پتانسیل نقش مهمی در افزایش محدوده طیفی آزاد (FSR) و کاهش پهنا در نصف مقدار بیشینه (FWHM) دارند. همچنین در اینجا به دو راه حل که یکی اضافه کردن لایه گرافن به فیلتر و دیگری گرتینگ کردن فیلتر نیز اشاره شده که در افزایش FSR و کاهش FWHM نقش موثری دارند.

در نهایت می توان از ساختار پیشنهادی جهت استفاده در سوئیچ های تنظیم پذیر با پهنای باند بالا و میزان تداخل کم استفاده کرد. همچنین در کارهای آینده با توجه به تنظیم پذیر بودن هدایت سطحی گرافن نسبت به تغییرات دما می توان از اثرات دما جهت طراحی سوئیچ گرافنی استفاده کرد.

#### ۴- نتیجه گیری

بطور خلاصه، در این مقاله یک میکروحلقة گرافنی جهت استفاده بعنوان سوئیچ الکترواپتیکی استفاده شده است. در ساختار پیشنهادی ابتدا بهترین شعاع در محدوده طول موج پیشنهادی، محاسبه و سپس اثرات پتانسیل شیمیایی و تعداد لایه های گرافن بررسی شد. در نهایت اثر استفاده از گرتینگ بر روی پهنای باند بررسی شده است. نتایج نشان داد با در نظر گرفتن گرتینگ دو برابر پهنای باند بیشتر از کارهای قبلی قابل دستیابی خواهد بود. با در نظر گرفتن کنترل هدایت سطحی گرافن از طریق پتانسیل شیمیایی بین ۰.۴ تا ۰.۶ الکترون ولت نشان داده شده است که پهنای باند به اندازه ۱.۶ برابر کارهای قبل یعنی ۸ تراهرتز قابل دستیابی هست. از طرفی با کنترل تعداد لایه های گرافن نشان داده می شود که حداکثر پهنای باند برای گرافن تک لایه امکان پذیر است. در نهایت جهت دستیابی به بیشترین پهنای باند در ساختار پیشنهادی اثر گرتینگ بررسی شد. با در نظر گرفتن پتانسیل شیمیایی ۰.۴ الکترون ولت بالاترین پهنای باند یعنی ۱۰ تراهرتز برای ساختار پیشنهادی بدست خواهد آمد.

#### مراجع

- [1] Chen, Bowen, et al. "Cost-effective survivable virtual optical network mapping in flexible bandwidth optical networks." *Journal of Lightwave Technology* 34.10 (2016): 2398-2412.
- [2] Hanson, Frank, and Stojan Radic. "High bandwidth underwater optical communication." *Applied optics* 47.2 (2008): 277-283.
- [3] Q. Xu, B. Schmidt, Sameer Pradhan, and Michal Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, vol. 435, pp. 325-327, 19 May 2005.
- [4] Rui, Guanghao, et al. "Detection of orbital angular momentum using a photonic integrated circuit." *Scientific reports* 6 (2016): 28262.
- [5] Z. Lu and W. Zhao, "Nanoscale electro-optic modulators based on graphene-slot waveguides," *Optical Society of America , Optics Express*, vol. 29, no. 6, pp. 1490–1496, Jun. 2012.

on a Mach-Zehnder interferometer employing optical Kerr effect." *Superlattices and Microstructures* 135 (2019): 106244.

[22] Li, Jian, et al. "All-optical controlling based on nonlinear graphene plasmonic waveguides." *Optics express* 24.19 (2016): 22169-22176.