

Vol. 11/ No. 43/Spring 2022

Design and Simulation of Voltage Controlled Plasmonic 4*1 Switch Based on Graphene Ribbons

Tohid Kalantari, MSc Student¹ | Mahdi Zavvari, Associate Professor² 

¹Department of Electrical Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, kalantari.tohid@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, m.zavvari@iaurmia.ac.ir

Correspondence

Mahdi Zavvari, Associate Professor of Department of Electrical Engineering, Urmia branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, Email: m.zavvari@iaurmia.ac.ir

Received: 9 November 2021

Revised: 24 November 2021

Accepted: 14 December 2021

Abstract

In this paper, a novel plasmonic optical switch based on graphene is designed and simulated with better features and four channels. Each of these channels has an equal width of 20nm which constructed from graphene ribbons spaced at a distance of 30nm from each other. The operation of device is based on the modulation of graphene chemical potential in each channel by using applied voltage. This means that by application of a proper voltage the transmission of input in every channel can be controlled and hence the switching can be occurred. Performance characteristics of this optical switch achieves a relatively high transmission with very low loss at the frequency of 30THz. Also in this structure the amount of crosstalk is remarkably low. This structure has been investigated in different chemical potentials in which one of it's best status occurs in chemical potential of 0.4eV. All analyses and simulations have been performed in Lumerical and MATLAB.

Keywords: Optical switch, Plasmonics, Graphene. Gate-Controlled

Highlights

- Voltage-controlled graphene plasmonic switch is presented.
- Simple structure of switch makes a facile fabrication process.
- Higher efficiency compared to previous structures.

Citation: T. Kalantari and M. Zavvari, "Design and simulation of voltage controlled plasmonic 4*1 switch based on graphene ribbons," *Journal of Communication Engineering (JCE)*, vol. 11, no. 43, pp. 1–14, 2022, (in Persian).

طراحی و شبیه‌سازی سوئیچ ۴*۱ پلاسمونیک مبتنی بر نوارهای گرافنی و باقابلیت کنترل توسط ولتاژ

توحید کلانتری^۱ | مهدی زواری^{۲*} 

چکیده:

در این مقاله، یک سوئیچ نوری گرافنی پلاسمونیک با ویژگی‌های بهینه‌تر و تعداد چهار کانال طراحی و شبیه‌سازی گردیده است. هر یک از این کانال‌ها دارای عرض یکسانی به اندازه ۲۰ نانومتر هستند که در فاصله ۳۰ نانومتری از هم قرار گرفته‌اند. عمل سوئیچینگ با اعمال ولتاژ به بخشی از کانال‌های خروجی قابل کنترل و تنظیم است و می‌توان توسط ولتاژ کانال خروجی را تعیین نمود. از ویژگی‌های عملکرد این سوئیچ نوری دستیابی به میزان گذردهی نسبتاً بالا با میزان تلفات بسیار کم در محدوده فرکانسی ۳۰ تراهرتز است. همچنین در این ساختار میزان هم‌سپاری به صورت محسوسی بسیار کم است. این ساختار در پتانسیل‌های شیمیایی متفاوتی بررسی شده که یکی از بهترین حالات آن در پتانسیل شیمیایی ۰,۴ اتفاد افتاده است. ساختار ساده و کنترل‌پذیری آسان از مزایای این ساختار است. تمامی تجزیه و تحلیل‌ها و همچنین شبیه‌سازی‌های مربوطه در نرم‌افزارهای Lumerical و MATLAB انجام پذیرفته‌اند.

کلید واژه‌ها: سوئیچ نوری، پلاسمونیک، گرافن، کنترل‌پذیر

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه مهندسی برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران،
m.zavvari@iaurmia.ac.ir

^۲ دانشیار الکترونیک، گروه مهندسی برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران،
tohid_kalantari@gmail.com

نویسنده مسئول

* مهدی زواری، دانشیار الکترونیک، گروه مهندسی برق، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران،
m.zavvari@iaurmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۸ آبان ۱۴۰۰

تاریخ بازنگری: ۳ آذر ۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۲۳ آذر ۱۴۰۰

۱- مقدمه

امروزه علم نانوفوتونیک به دلیل گستره قابل توجهی از کاربردها و مزایای قابل توجه، با گسترش قابل توجهی مواجه بوده است. پلاسمونیک به‌عنوان یکی از زمینه‌های کاری در این حوزه مطرح است که در خصوص محدودسازی و حصر میدان الکترومغناطیسی در ابعاد برابر یا کوچک‌تر از طول موج نور می‌پردازد و اساس آن اندرکنش بین تابش الکترومغناطیسی و الکترون‌های رسانش در سطح مشترک فلز و دی‌الکتریک و یا در نانو ساختارهای فلزی است که منجر به تقویت میدان نزدیک نوری در ابعاد زیر طول موج می‌شود. هدایت و انتقال پلاریتون پلاسمون سطحی بر روی یک سطح تخت و هموار را می‌توان با تغییر موضعی پراکندگی آن از طریق ایجاد ساختارهایی بر روی سطح انجام داد [۱]. محصورشدگی جانبی در نوار فلزی و موجبر سیمی که شامل متمرکز کردن پلاریتون پلاسمون سطحی در ساختارهای بنیادی است انجام می‌گیرد. ساختارهایی مانند ساختارهای نامتجانس فلز/ نارسانا / فلز که در نقطه مقابل نوارهای فلزی هستند، گزینه‌های مناسبی برای موجبری باقابلیت محصورسازی خوب و طول انتشار قابل قبول هستند، به‌خصوص در هندسه‌هایی به صورت تورفتگی‌های V شکل، که برانگیختگی‌های پلاسمونی جای گزیده در نانو ذرات فلزی نیز می‌توانند به‌عنوان شرایط موجبری استفاده شود [۲-۴]. این به آن علت است که انتقال انرژی از طریق جفت‌شدگی میدان نزدیک بین ذره‌های مجاور در زنجیره‌های خطی صورت می‌گیرد. مشکل قابل توجهی که در ادوات پلاسمونی ساخته‌شده از مواد پلاسمونی مرسوم، مثل فلزها، وجود دارد این است که این مواد دارای تلفات اهمی قابل توجهی در گستره‌های فرکانسی مختلف هستند [۵]. به همین خاطر، این مسئله تلفات راندمان ادوات

پلاسمونی را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهد. از طرفی گرافن در خواص الکترونیکی، مغناطیسی و اپتیکی غیرخطی جالبش، دارای تلفات بسیار پایین در گستره ترا هرتز و مادون قرمز بوده و از طرفی دیگر امکان تشکیل پلاسمون‌های سطحی در آن نیز وجود دارد [۶].

از این رو، در سال‌های گذشته استفاده از این ماده در طراحی و ساخت ادوات پلاسمونی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۷]. اساس کار و قابلیت این ساختارها بر پایه پلاسمونهای سطحی، تشدیدهای پلاسمونی و توانائی کنترل خواص آن‌ها با اعمال ولتاژ به ساختار است. یکی از خصوصیات منحصر به فرد گرافن این است که قسمت موهومی رسانندگی اپتیکی آن در گستره‌های مختلف فرکانسی می‌تواند مثبت و یا منفی باشد که این مقادیر مثبت و یا منفی وابسته به مقادیر پتانسیل شیمیایی گرافن خواهد بود. زمانی که این مقدار مثبت است، گرافن شبیه به یک لایه بسیار نازک فلزی رفتار کرده و امکان تشکیل پلاسمونهای سطحی، به ازای قطبش TM، در آن وجود دارد. اما در حالتی که مقدار آن منفی است امکان تشکیل این مدها به ازای قطبش TE در گرافن وجود دارد که قابلیت انتشارشان در این قطبش ضعیف‌تر از قطبش TM است [۸]. گرافن در قیاس با مواد پلاسمونی مرسوم، مثل فلزات طلا و نقره، دارای دو مزیت است. اولاً طول انتشار و طول موج پلاسمونهای سطحی گرافن در ناحیه مادون قرمز میانی (mid-IR)، در مقایسه با پلاسمونهای سطحی تشکیل شده در طلا و نقره، دارای ویژگی ارزنده‌تری هستند. بدین معنی که طول موج پلاسمونهای سطحی در گرافن بسیار کوچک‌تر از طول موج نور در خلأ بوده در حالی که طول انتشار آن‌ها بزرگ است [۹]. دومین مزیت گرافن داشتن خواص اپتیکی تنظیم‌پذیر، به کمک اعمال ولتاژ خارجی و یا آلیاژ، مهم‌ترین مزیتی است که گرافن نسبت به لایه‌های نازک فلزی دارد. از این رو، انقطاع و همکاری در مقاله‌ای گزارش کردند که با اعمال ولتاژ خارجی به گرافن و با به وجود آوردن نواحی که علامت ترم موهومی آن‌ها متفاوت است، می‌توان انتشار پلاسمونهای سطحی در آن را مهندسی کرده و بنابراین امکان طراحی و ساخت ادواتی پلاسمونیک بر پایه گرافن (مثل موجبر در یک تک لایه گرافن) در طیف ترا هرتز و مادون قرمز وجود دارد [۱۰].

در سال ۲۰۱۳ گومز دیاز و همکارانش تئوری، آنالیز و طراحی سوئیچ‌های سری برای موج‌برهای پلاسمونیک با نوار گرافنی را در نزدیک فرکانس‌های مادون قرمز ارائه دادند. در این نوع سوئیچ‌ها کلید زنی با استفاده از تأثیر میدان گرافن برای فعال‌سازی یا قطع کردن انتشار روی یک قسمت از موجبر با نوار گرافنی به دست می‌آید که باین‌وجود انتقال بهتر و ایزولاسیون بالاتری را سبب می‌شد [۱۱]. در همان سال هونگ چو و چون گان تحقیقات در رابطه با یک سوئیچ پلاسمونیک فعال بر پایه نوار گرافنی دوپ شده تک لایه و چندلایه در طیف میانی مادون قرمز را انجام داده و محاسبات تئوری و عددی را ارائه نمودند. نتایج نشان دادند که جابه‌جایی‌های طول موج رزونانسی و عمق مدولاسیون قابل توجهی می‌توانست با تغییر آرام دقت دوپینگ نوار گرافن به دست آید [۱۲].

در سال ۲۰۱۷ عمادی و همکارانش سوئیچ موجبر سطحی پلاسمونی بر پایه گرافن در نزدیکی فرکانس‌های مادون قرمز را ارائه نمودند که بر اساس موجبر شاخه Y برای عمل در فرکانس ۳۰ ترا هرتز طراحی شده بود [۱۳]. بانا و همکارانش یک سوئیچ تمام اپتیکی با رینگ رزوناتور کوپل شده نانومتری را در سال ۲۰۱۷ ارائه نمودند که بر پایه ماده غیرخطی بود [۱۴]. نتایج نشان می‌دادند که هر دوی ساختارها یعنی حفره تک حلقه و جفت حلقه قادر به برقراری اثر سوئیچینگ اپتیکی بودند. از مزایای این کار ساختار ساده آن بود. علاوه بر این، سوئیچ‌های پلاسمونیک حفره تک حلقه مزیت‌های بسیاری اعم از اندازه یکنواخت، پمپ شدت نور کمتر، پاسخ‌دهی بسیار سریع در حد فمتو ثانیه و غیره را دارا هستند. در این مقاله سعی بر این است که با استفاده از ساختار پلاسمونیک گرافن، یک سوئیچ کنترل شونده با ولتاژ ساده ساخته شود که دارای مشخصات عملکردی بهینه و قابلیت کنترل و تنظیم‌پذیری داشته باشد. در کارهای پیشین عمدتاً مشکل ساخت به‌عنوان یک چالش طراحی است برای مثال در ساختارهای تشدیدگر حلقوی طول موج کاری به‌شدت وابسته به مشخصات و ابعاد حلقه است و ایجاد تغییرات ولو در مقادیر پایین در این ناحیه عملکرد المان را به‌طور قابل توجهی تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. مشابه چنین مشکلاتی برای ساختارهای دوپ شده نیز مطرح است. مزیت ساختار پیشنهادی سادگی طراحی و در نتیجه پیاده‌سازی آسان‌تر آن و نیز تحمل تلورانس ابعاد نیز است. ترتیب بخش‌های مقاله به این صورت است که روش تحقیق و نحوه مدل‌سازی در بخش دوم، ارائه ساختار پیشنهادی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن در بخش سوم و جمع‌بندی مقاله در بخش ۴ آورده شده است.

۲- روش پیشنهادی شبیه‌سازی

مقاله همانند سایر مسائل حوزه میدان‌ها و امواج، اساس کار حل معادلات ماکسول تحت شرایط مرزی مشخص شده برای ساختار سوئیچ پیشنهادی است. با توجه به پیچیدگی شکل ساختار و عدم دسترسی به جواب‌های تحلیلی برای چنین ساختارهایی، یکی از راهکارهای پیشنهادی استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان، FDTD، یک روش پیشرفته برای حل معادلات ماکسول در هندسه‌های پیچیده است که به‌عنوان یک راه‌حل مستقیم زمان و مکان، محقق را به بینش منحصر به فردی در مسائل الکترومغناطیس و فوتونیک ارائه می‌دهد [۱۵]. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزارهای شرکت Lumerical، که پیشرو در زمینه شبیه‌سازی‌های فوتونیک و اپتوالکترونیک هستند استفاده می‌شود. برای انجام تحلیل‌های سه‌بعدی ساختار از FDTD Solutions و برای انجام تحلیل‌های مدی ساختار از نرم‌افزار Mode Solutions استفاده می‌کنیم. به خاطر اینکه روش FDTD متکی به تفاضل محدود معادلات ماکسول است، می‌تواند تنها در تعداد محدودی از نقاط که نشان‌دهنده دامنه محاسباتی هستند عمل کند. این مسئله برای منابع محاسباتی شبیه‌سازی، مشکلات زیادی را ایجاد کرده است. زیرا تنها مقدار محدودی از نقاط محاسباتی می‌تواند در حافظه کامپیوتر ذخیره شود [۱۶]. تلاش‌های زیادی در محیط‌های تحقیقاتی برای جستجوی روش شبیه‌سازی فضای بینهایت در حافظه کامپیوتر انجام شده است و تمام این تلاش‌ها به تعیین انواع مختلف شرایط مرزی منجر شده است. در این کار از شرط مرزی لایه‌های کاملاً همسان (PML) استفاده شده است.

با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین پارامترها در ادوات اپتیکی و علی‌الخصوص سوئیچ‌ها، میزان نرخ عبور و نیز تلفات است برای محاسبه آن از دو مانیتور در ابتدا و انتهای ساختار استفاده می‌شود تا بتوانند توان و اندازه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در ابتدای ساختار جایی که نور از منبع به ساختار کوپل می‌شود و نیز در انتها که مشخص‌کننده اعمال عملکرد ساختار بر مشخصه نور عبوری را دارد استخراج نماید. برای محاسبه نرخ عبور نسبت توان نور خروجی بر توان ورودی با اسکریپت نویسی در محیط نرم‌افزار لومریکال قابل استخراج خواهد بود:

$$T = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1)$$

که در آن P_2 توان نور خروجی و P_1 توان نور ورودی است.

همچنین با فرض عدم انعکاس موج تابشی نرخ تلفات به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Loss = 1 - \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

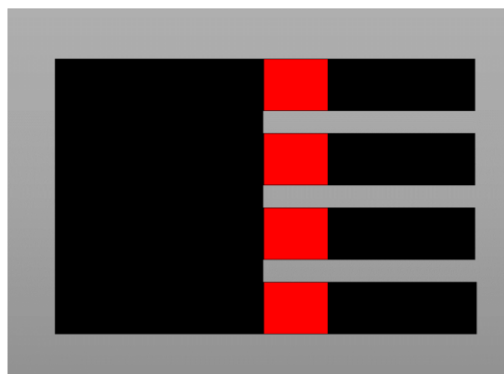
هم‌شناویی نیز یکی از مهم‌ترین پارامترهای قابل بررسی برای یک سوئیچ است که در آن میزان نفوذ و تزویج سیگنال از یک کانال به کانال‌های مجاور مورد بررسی قرار می‌گیرد و نحوه محاسبه آن بدین صورت است که نرخ عبور از کانال مدنظر در مد خاموش با استفاده از رابطه (۱) و برای زمانی که کانال مجاور در مد هدایت است محاسبه می‌شود.

۳- ساختار پیشنهادی و نتایج و بحث

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ساختار سوئیچ گرافن-پلاسمونیک دارای یک بستر SiO_2 است که بر روی آن لایه‌ای گرافنی قرار گرفته است (ضخامت گرافن تک لایه در حدود 0.345 نانومتر است). این سوئیچ دارای چهار کانال مجزا از هم است که به فاصله 30 نانومتر از یکدیگر قرار گرفته‌اند. هر یک از این کانال‌ها دارای عرض یکسان 20 نانومتر هستند که تشکیل موجبر گرافنی پلاسمونیک را داده‌اند. مطابق شکل نور که از قسمت ابتدایی ساختار وارد می‌شود در صورت باز بودن هر یک از این کانال‌ها وارد آن‌ها می‌شود. در ادامه به بررسی بیشتر راجع به چگونگی باز یا بسته بودن کانال‌ها و نقش آن‌ها در مورد سوئیچینگ می‌پردازیم. برای قطع و وصل هر یک از کانال‌های مورد نظر کلیدی گرافنی در مسیر موجبری کانال‌ها تعبیه شده که با روشن و خاموش کردن این کلید عمل قطع و وصل اتفاق می‌افتد. شکل ۲ محل قرارگیری این کلیدهای گرافنی را نمایش می‌دهد. اساس عملکرد این کلیدها بر مبنای وابستگی پتانسیل شیمیایی و در نتیجه گذردهی گرافن به ولتاژ اعمالی است. به عبارت بهتر با اعمال ولتاژ به هر کدام از این کلیدها می‌توان تعیین نمود که کدام سوئیچ برای انتقال سیگنال در نظر گرفته شود.



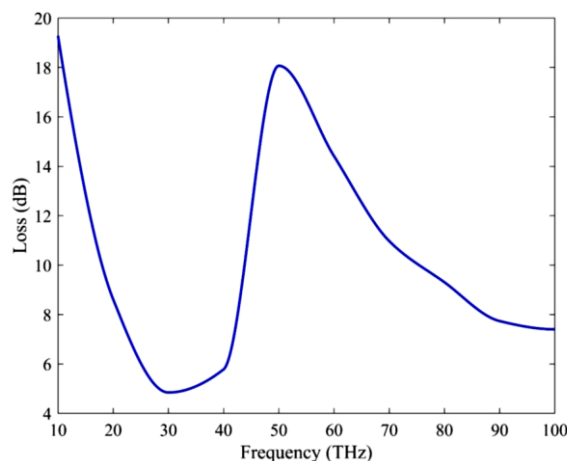
شکل ۱: شمای سه بعدی ساختار پیشنهادی



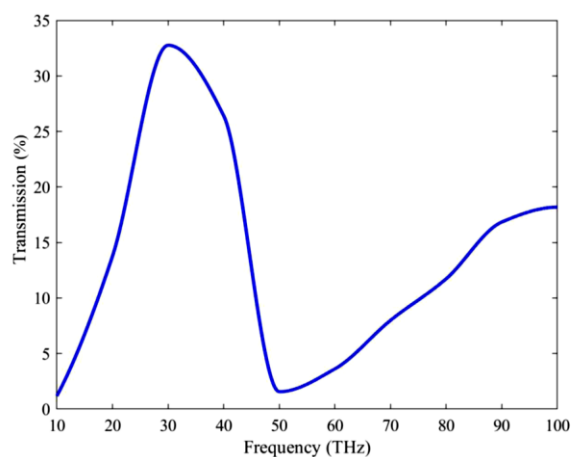
شکل ۲: محل جاگیری کلیدهای قطع و وصل گرافنی بر روی موجبرها. کلیدها با رنگ‌های قرمز بر روی موجبرهای مشکی رنگ نشان داده شده‌اند.

تمامی ادوات نوری دارای مشخصات خاصی هستند که از جمله پارامترهای مهم این ادوات می‌توان به تلفات ساختاری اشاره نمود. در این سوئیچ نوری که از امواج پلاسمونیک بهره برده می‌شود نیز تلفات وجود دارد، زیرا که امواج پلاسمونیک که در سطح فلزات وجود دارند همیشه باعث ایجاد تلفات بسیار زیاد در موجبر می‌شوند که این امر نیز به دلیل وجود فلز و جذب نور توسط آن اتفاق می‌افتد. ولی در اینجا به دلیل استفاده از خاصیت فلزی گرافن، مقدار تلفات نیز در فرکانس‌های خاصی تا حدی بسیار کاهش داشته است. شکل ۳ میزان تلفات ساختار را در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ ترا هرترزی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ قابل مشاهده است، میزان تلفات ساختار در ۳۰ ترا هرترز حدود ۵ دسی‌بل بوده و بیشترین تلفات آن در فرکانس‌های ۱۰ و ۵۰ ترا هرترز دیده می‌شود. این تلفات در بهترین و بهینه‌ترین حالت این ساختار رخ داده‌اند. به عبارت بهتر در تلاش برای یافتن نقطه بهینه عملکرد ساختار شبیه‌سازی‌های متعددی صورت گرفت و در این شبیه‌سازی‌های مربوط به ساختار که دارای موجبرهایی با عرض‌های متفاوت و همچنین فاصله‌های مختلف از یکدیگر بودند، تلفات موجبری و تلفات کلی ساختار بسیار زیاد بود و در برخی حالات، حتی نور ورودی به دلیل تلفات بسیار بالا وارد موجبرها نمی‌شد و گذردهی از ساختار رخ نمی‌داد. در نهایت با سوئیچ کردن به بهترین حالت ممکن برای ساختار پیشنهادی دست یافتیم.

از دیگر پارامترهای مهم برای ادوات اپتیکی و به خصوص سوئیچ‌های نوری پارامتر انتقال نوری است که همان مقدار توان خروجی به توان ورودی سوئیچ را نشان می‌دهد. شکل ۴ میزان عبور یا انتقال ساختار را به صورت تابعی از فرکانس به نمایش می‌گذارد. بیشترین میزان تلفات همان‌گونه که از شکل می‌توان دریافت، مقدار گذردهی در حالتی افزایش و سپس کاهشی دارد و بیشترین مقدار آن در فرکانس ۳۰ ترا هرترز اتفاق افتاده است که تقریباً برابر با ۳۳٪ است. بنابراین بهترین عملکرد این سوئیچ در فرکانس ۳۰ ترا هرترز است و بنا به شرایط تلفات و همچنین گذردهی تمامی شبیه‌سازی‌ها در فرکانس ۳۰ ترا هرترز انجام گرفته‌اند. در ادامه، شبیه‌سازی‌هایی در رابطه با هم‌شنوایی سایر کانال‌ها انجام شده و میزان آن‌ها به صورت نموداری در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰ ترا هرترز در شکل ۵ به نمایش درآمده است. همان‌طور که می‌توان در شکل مشاهده کرد، هم‌شنوایی کانال‌های



شکل ۳: شمای نمودار تلفات ساختار پیشنهادی در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰ ترا هرتز. بیشترین میزان تلفات مربوط به فرکانس‌های ۱۰ و ۵۰ ترا هرتز بوده و کمترین در فرکانس ۳۰ ترا هرتز رخ داده است.



شکل ۴: نمودار انتقال نوری ساختار پیشنهادی در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۱۰۰ ترا هرتز.

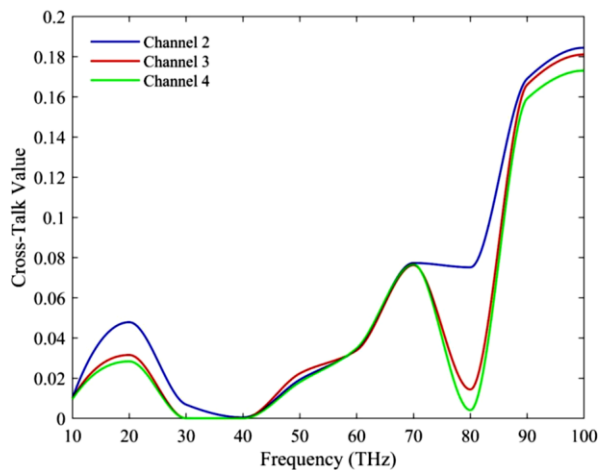
مجاور به صورت نموداری کنار هم آورده شده‌اند که در این بین بیشترین هم‌شنوایی را نزدیک‌ترین کانال یعنی کانال ۲ و کمترین هم‌شنوایی را دورترین کانال یعنی کانال ۴ دارد. در حالت کلی این هم‌شنوایی‌ها در فرکانس کاری ۳۰ ترا هرتز بسیار کم هستند.

شکل ۶ پروفایل توزیع میدان الکتریکی سوئیچ را نشان می‌دهد که، در اینجا نیز می‌توان نحوه حرکت و پخش میدان داخل کانال ۱ که کلید آن وصل است را مشاهده نمود. در این تصویر کانال ۱ که بالاترین کانال است در حالت باز قرار دارد و کانال ۲، ۳ و ۴ به ترتیب از بالا به پایین در حالت قطع هستند و بدین ترتیب پروفایل میدان الکتریکی ایجاد شده در ساختار مشاهده می‌شود. پرواضح است که با اعمال ولتاژ به کلید کانال اول مسیر برای انتقال موج فراهم می‌شود درحالی‌که بقیه کانال‌ها مسدود بوده و بنابراین سوئیچ با اعمال ولتاژ قادر به انتخاب مسیر و کانال خروجی خواهد بود. در صورتی‌که مطالعه برای سایر کانال‌ها انجام بگیرد نتیجه مشابهی حاصل خواهد گردید.

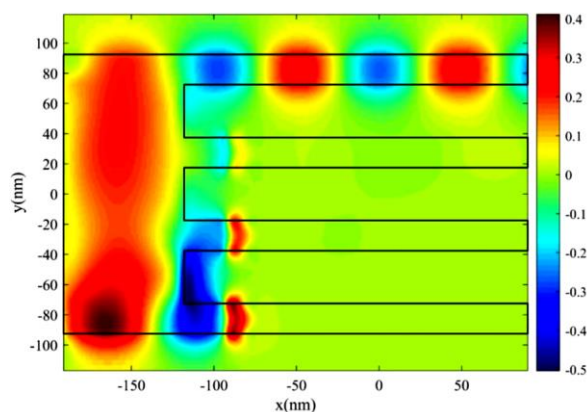
در ادامه با توجه به اینکه رفتار گرافن و در نتیجه ساختار به پتانسیل شیمیایی گرافن وابسته است به بررسی نحوه رفتار ساختار در پتانسیل‌های شیمیایی مختلف می‌پردازیم. در این قسمت برای قسمت گرافنی ساختار، پتانسیل‌های شیمیایی متفاوتی را در نظر گرفته‌ایم و بیشینه انتقال سیگنال را به ازای مقادیر مختلف آن در کانال‌ها اندازه می‌گیریم که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، بیشترین میزان عبور این ساختار در پتانسیل شیمیایی ۰/۴ اتفاق افتاده است که این میزان مبنای پتانسیل کاری شبیه‌سازی‌ها در این کار است.

پارامتر دیگری که در محاسبات برای سوئیچ‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود نرخ خاموشی است. نرخ خاموشی میزان توان نوری انتقالی در موجبر نوری را مشخص می‌کند. نسبت بیشترین توان خروجی بر کمترین توان خروجی در یک بازه طول‌موجی را نرخ خاموشی در نظر می‌گیریم. این مقدار توسط رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

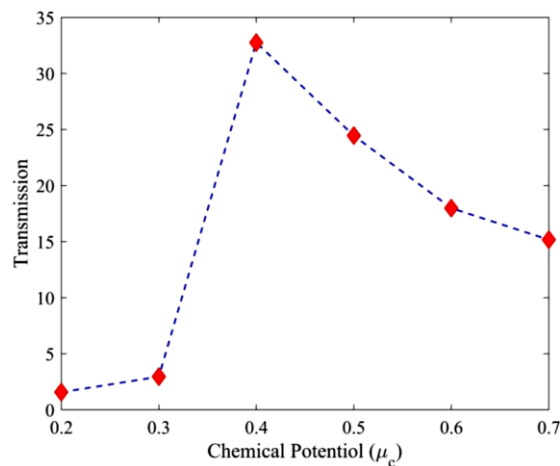
$$ER = 10 \log_{10} \frac{\max P_{out}}{\min P_{out}} \quad (3)$$



شکل ۵: نمودار هم‌شنوایی کانال‌های مختلف در بازه فرکانسی مربوطه.



شکل ۶: تصویر پروفایل توزیع میدانی ساختار پیشنهادی برای کلید باز کانال اول



شکل ۷: نمودار میزان عبور یا گذردهی ساختار در پتانسیل‌های شیمیایی مختلف.

مقدار نرخ خاموشی محاسبه شده این ساختار ۱۳,۳۸ دسی بل است. برای مقایسه نتایج به دست آمده با سایر کارهای مشابه پیشین در جدول (۱) به صورت خلاصه پارامترهای مؤثر ساختارهای ارائه شده آورده شده است. نتایج مؤید آن است که ساختار پیشنهادی از نظر ابعاد بسیار فشرده تری دارد هرچند به ازای این کاهش ابعاد مقدار انتقال نوری در آن نسبتاً کاهش یافته است.

جدول ۱: مقایسه نتایج ساختار پیشنهادی با کارهای دیگران

مرجع	نوع	انتقال (%)	تلفات (%)	ابعاد (nm)	فرکانس (THz)
[۱۷]	دو کاناله	۵۰	۵۰	۴۵۰۰×۱۵۰	۶
[۱۸]	دو کاناله	۴۳	۵۷	۲۲۴۱۷×۱۲۷۵۰	۶
[۱۹]	چهار کاناله	۲۵	۷۵	۱۰۰۰۰×۱۳۰۰۰	۱۹۳
[۱۱]	تک کاناله	۴۰	۶۰	۱۵۰×۳۵۰	۳۰
[۲۰]	تک کاناله	۴	۹۶	۵۰۰×۶۰۰	۳۰
[۲۱]	تک کاناله	۱۵	۸۵	۱۳۰۰×۴۰۰	۳۳
این مقاله	چهار کاناله	۳۳	۶۷	۳۱۰×۱۸۵	۳۰

۴- نتیجه گیری

نتیجه در این مقاله، یک سوئیچ نوری گرافنی پلاسمونیک با ویژگی‌های بهینه تر ارائه و طراحی گردید. این سوئیچ دارای چهار کانال مجزا است که عرض هر یک از این سوئیچ‌ها ۲۰ نانومتر و فاصله آن‌ها از یکدیگر ۳۰ نانومتر است. مهم‌ترین ویژگی این سوئیچ قابلیت کنترل آن با ولتاژ است که می‌توان هر کدام از خروجی‌ها را با اعمال ولتاژ تعیین و کنترل نمود. اساس اصل کنترل و انتخاب خروجی‌ها تغییر ویژگی‌های گرافن با ولتاژ است. از دیگر ویژگی‌های عملکرد این سوئیچ نوری گرافنی دستیابی به میزان گذردهی نسبتاً بالا ۳۳٪ با میزان تلفات بسیار کم ۵ دسی بل در فرکانس ۳۰ ترا هرتزی است. اندازه کلی این ساختار ۱۸۵ × ۳۱۰ نانومتر است که این ساختار را در پتانسیل‌های شیمیایی متفاوتی بررسی کردیم و بهترین حالت آن در پتانسیل شیمیایی ۰/۴ اتفاق افتاده است. همچنین میزان نرخ خاموشی این سوئیچ به مقدار ۱۳/۳۸ دسی بل اندازه‌گیری شده است و در نهایت تلفات الحاقی ساختار را بررسی کردیم که در فرکانس ۳۰ ترا هرتزی دارای تلفات الحاقی ۱۵ دسی بل است.

مراجع

- [1] W. Park, "Optical interactions in plasmonic nanostructures," *Nano Converg.*, vol. 1, no.2, pp. 1-27, 2013, doi:10.1186/s40580-014-0002-x.
- [2] R. G. H. Aryanfar, "Nanoscale plasmonic filter based on coupled metal-insulator-metal waveguides using nonlinear nanoslot resonator," *J. Nanophoton.*, vol. 9, no.1, pp. 093799-1-093799-7, 2015, doi:10.1117/1.JNP.9.093799.
- [3] Y. G. X. Zeng, H. Hu, D. Ji, Q. Gan, F. Bartoli, "A metal-insulator-metal plasmonic Mach-Zehnder interferometer array for multiplexed sensing," *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no.13, p. 133102, 2013, doi:10.1063/1.4798942.
- [4] J. Y. H. Wang, J. Zhang, J. Huang, W. Wu, D. Chen, G. Xiao, "Tunable band-stop plasmonic waveguide filter with symmetrical multiple-teeth-shaped structure," *Opt. Lett.*, vol. 41, no.6, pp. 1233-1236, 2016, doi:10.1364/OL.41.001233.
- [5] K. L. Y. Gong, J. Huang, N. J. Copner, A. Davies, L. Wang, T. Duan, "Frequency-selective nanostructured plasmonic absorber by highly lossy interface mode," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 124, pp. 511-525, 2012, doi:10.2528/PIER11121903.
- [6] V. A. D. Abergel, J. Berashevich, K. Ziegler, T. Chakraborty "Properties of graphene: a theoretical perspective," *Advances in Physics*, vol. 59, no.4, pp. 261-482, 2010, doi:10.1080/00018732.2010.487978.
- [7] A. K. P. Karimi Khozani, "Analytic calculation of dispersion curve in graphene-based one dimensional periodic structures," *J. Appl. Electromag.*, vol. 4, pp. 39-46, 2015 (In Persian).
- [8] F. Abajo, "Graphene Plasmonics: Challenges and Opportunities," *ACS Photonics*, vol. 1, no.3, pp. 135-152, 2014, doi:10.1021/ph400147y.

- [9] P. A. T. Low, "Graphene Plasmonics for Terahertz to Mid-Infrared Applications," *ACS Nano*, vol. 8, no.2, pp. 1086-1101, 2014, doi:10.1021/nn406627u.
- [10] N. E. A. Davoyan, "Electrically controlled one-way photon flow in plasmonic nanostructures," *Nature Communications*, vol. 5, no.5250, 2014, doi:10.1038/ncomms6250.
- [11] J. P.-C. J. S. Gómez-Díaz, "Graphene-based plasmonic switches at near infrared frequencies," *Opt. Express*, vol. 21, no.13, pp. 15490-15504, 2013, doi:10.1364/OE.21.015490.
- [12] C. H. G. C. Hong-Son, "Active plasmonic switching at mid-infrared wavelengths with graphene ribbon arrays," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no.23, 2013, doi:10.1063/1.4810003.
- [13] R. S. R. Emadi, A. Zeidaabadi Nezhad, R. Emadi, "Analysis and design of graphene-based surface plasmon waveguide switch at long-wavelength infrared frequencies," *IEEE Sel. Top. Quant. Electron.*, vol. 23, no.5, pp. 1-9, 2017, doi:10.1109/JSTQE.2017.2660881.
- [14] X. P. X. Bana, X. Li, B. Hu, Y. Guo, H. Zheng, "A nonlinear plasmonic waveguide based all-optical bidirectional switching," *Opt. Commun.*, vol. 406, pp. 124-127, 2018, doi:10.1016/j.optcom.2017.06.040.
- [15] M. R. E. A. Ebrahimzadeh, "Analysis of Wall Structure Effects on Indoor Wireless Channel Parameters Using the FDTD Method," *J. Appl. Electromag.*, vol. 4, pp. 27-35, 2016 (In Persian).
- [16] A. M. J. Shiri, "EIT-Based Graphene Nanostructure Detectors for Detecting Materials Using Terahertz Waves," *J. Appl. Electromag.*, vol. 6, pp. 41-48, 2018 (In Persian).
- [17] M. K. M.-F. M. Yarahmadi, Leila Yousefi, "Subwavelength graphene-based plasmonic THz switches and logic gates ", *IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech.*, vol. 5, no.5, pp. 725-731, 2015, doi: 10.1109/TTHZ.2015.2459674.
- [18] M. K. M.-F. M. Yarahmadi, L. Yousefi, "Compact low power graphene-based Y-branch THz switch," *Third Conference on Millimeter-Wave and Terahertz Technologies (MMWATT)*, 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/MMWaTT.2014.7057191.
- [19] H. A.-B. M. Taleb Hesami, M. Zavvari, "A high efficiency optical power splitter in a y-branch photonic crystal for DWDM optical communication systems," *Frequenz*, vol. 72, no.1-2, pp. 79-84, 2017, doi:10.1515/freq-2016-0265.
- [20] M. Derakhshi, D. Fath, "Terahertz plasmonic switch based on periodic array of graphene/silicon," *Scientia Iranica F*, Vol. 24, no.6, pp.3452-3457, 2017, doi: 10.24200/SCI.2017.4423.
- [21] H.-J. Li, L.-L. Wang, Z.-R. Huang, B. Sun, and X. Zhai, "Tunable mid-infrared plasmonic anti-symmetric coupling resonator based on the parallel interlaced graphene pair," *Plasmonics*, vol. 10, pp. 39-44, 2015, doi:10.1007/s11468-014-9774-4