

بهینه‌سازی موجبر گرافین- فوتونیک کریستال در گیت‌های منطقی با استفاده از شبکه عصبی

علی نامدار، مریم محیط‌پور و گوهر ورامینی

غیرخطی [۴]، اثر کر نوری در تشدید کننده‌های میکرو رینگ و جذب غیرخطی در یک تشدید کننده نیمه‌هادی ریز مسیر با سابقه تکی حالت هستند [۵] تا [۱۱]، با توجه به اهمیت گیت‌های پلاسمونیک در ساختارهای الکترونیکی و نیاز به بهبود عملکرد آن‌ها، انجام تحقیقات پیرامون بهینه‌سازی آن‌ها با استفاده از شبکه عصبی پیشرو بسیار ضروری است. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، می‌توان در طراحی و ساخت گیت‌های پلاسمونیک با کارایی بالاتر و عملکرد بهینه‌تر استفاده کرد. همچنین، این تحقیق می‌تواند به منظور پیدا کردن راه‌حل‌های جدید در طراحی گیت‌های پلاسمونیک و دستیابی به عملکرد بالاتر و سرعت بالاتر در ساختارهای الکترونیک مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر موارد یاد شده در زیر به بیان چند مورد از دلایل و اهمیت‌های انجام پژوهش جهت رفع مشکلات موجود به‌صورت خلاصه و مجزا پرداخته می‌شود که شامل:

۱- بهبود عملکرد گیت‌های منطقی: با استفاده از شبکه عصبی پیشرو، می‌توان به‌صورت دقیق‌تر و با دقت بالاتر، عملکرد گیت‌های منطقی را بهبود داد. در نتیجه، سامانه‌های الکترونیک قابل اعتمادتر و کارآمدتر خواهند بود.

۲- کاهش هزینه‌ها: با بهینه‌سازی گیت‌های منطقی، مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به سامانه الکترونیک کاهش می‌یابد در نتیجه، قابلیت رقابت با سامانه الکترونیکی دیگر افزایش خواهد یافت.

۳- افزایش سرعت: با بهینه‌سازی گیت‌های منطقی، سرعت سامانه الکترونیک بهبود یافته در نتیجه، عملکرد سامانه‌های الکترونیک بهبود پیدا می‌کند و کاربردهای آن‌ها گسترش می‌یابد.

۴- افزایش دقت: با استفاده از شبکه عصبی پیشرو، دقت بالاتر در بررسی و بهینه‌سازی گیت‌های منطقی حاصل می‌شود. در نتیجه، خطاهای ممکن در عملکرد سامانه الکترونیکی کاهش پیدا می‌کند.

۵- توسعه فن‌آوری: با تحقیقات بیشتر در زمینه بررسی و بهینه‌سازی گیت‌های منطقی پلاسمونیک با استفاده از شبکه عصبی پیشرو، فن‌آوری‌های جدیدی برای سامانه‌های الکترونیکی ایجاد خواهد شد.

علاوه بر بهینه‌سازی ورودی‌ها، مهم است که معماری و پارامترهای شبکه عصبی را نیز بهبود بخشید تا بهره‌وری و دقت مدل به حداکثر برسد. همچنین، بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج و عملکرد شبکه بر روی داده‌های ارزیابی و اعمال تغییرات لازم نیز جزئی مهم از فرایند بهبود و بهینه‌سازی شبکه است. با توجه به اینکه پژوهش ما در حوزه بهینه‌سازی و طراحی گیت‌های منطقی پلاسمونیک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است. هدف افزایش سرعت و کارایی در پردازش اطلاعات و ارتباطات در سیستم‌ها و شبکه‌های الکترونیکی با استفاده از فناوری پلاسمونیک، بدون حذف برخی از پارامترهای اساسی طراحی است.

چکیده: گیت‌های منطقی تمام‌نوری با فرکانس کاری تراهرتز (THz) از اجزای حیاتی برای تحقق مدارهای پردازش سیگنال و محاسبات نوری فوق‌سریع و کم‌مصرف به شمار می‌روند. در این پژوهش، گیت‌های منطقی فشرده و کارآمد AND و OR بر پایه موجبرهای پلاسمونیک گرافینی در فرکانس کاری ۳۰ تراهرتز طراحی و مدل‌سازی عددی شده‌اند. تحریک مد‌های پلاسمون سطحی (SPP) از طریق یک آنتن دوقطبی الکترونیکی بر روی بستر گرافین معلق صورت گرفته و منطق صفر و یک به‌صورت الکترواستاتیکی با تنظیم پتانسیل شیمیایی گرافین در بازوهای ساختار اعمال می‌شود. به منظور بهینه‌سازی غیرخطی چندپارامتری ساختار بدون نیاز به حذف پارامترهای پایه‌ای، از شبکه عصبی عمیق با معماری حافظه کوتاه‌مدت ماندگار (LSTM) استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود (FEM) نشان می‌دهد که گیت AND پیشنهادی به بازده انتقال حدود ۶۳ درصد در حالت «۱۱» دست یافته و انتقال در سایر حالت‌ها را کاملاً مهار می‌کند. همچنین شبکه LSTM با دستیابی به ضریب تعیین بالاتری نسبت به شبکه‌های پیش‌خور معمولی ($R^2=0.54$) نشان می‌دهد. این رویکرد پیشنهادی بستری مطمئن و مقیاس‌پذیر برای طراحی و بهینه‌سازی سریع پردازنده‌های نانوفوتونیک نوین فراهم می‌سازد.

کلیدواژه: پلاسمونیک گرافین، گیت‌های منطقی نوری، تراهرتز (THz)، یادگیری عمیق، شبکه LSTM، تنظیم پتانسیل شیمیایی..

۱- مقدمه

تاکنون طرح‌های مختلفی برای عملیات منطقی تمام نوری پیشنهاد و استفاده شده است. به عنوان مثال، برخی از طرح‌هایی که اغلب برای طراحی و ساخت گیت‌های تمام نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل اثر تداخل خطی در موجبر پلاسمونیک فلزی عایق ترکیبی [۱]، شفافیت القاشده از پلاسمون روی تراشه قابل تنظیم تمام نوری در مدارهای پلاسمونیک [۲]، اختلاط چهار موجی در موجبر سیلیکونی و اختلاط چهار موجی پراکندگی براگ در فیبر غیرخطی [۳]، انتقال شکاف باند در موجبرهای موج کریستال فوتونیک کوپل از نوع حفره هوا واقع‌گرایانه

این مقاله در تاریخ ۲۴ خرداد ماه ۱۴۰۵ دریافت و در تاریخ ۱۵ شهریور ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

علی نامدار، گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، (ali.namdar@iau.ac.ir).

مریم محیط‌پور (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، (email: ma.mohitpour@iau.ac.ir).

گوهر ورامینی، گروه مهندسی برق، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران، (email: gohar.varamini@iau.ac.ir).

بر ساختارهای پلاسمونیک در ماتریس کریستال مایع پرداختند. در این طراحی، با تابش نور به ساختار، پلاسمون‌های سطحی موضعی بر روی نانوذرات مربعی شکل طلا تحریک می‌شوند. تشدید پلاسمونیک به هندسه، جنس و ضریب گذردهی محیط اطراف نانوذرات وابسته است و منجر به جذب نور در طول موج تشدید می‌شود. به دلیل وجود لایه‌ی طلا به‌عنوان زیرلایه، نور در طول موج‌های غیر از تشدید بازتاب می‌شود و عبوری از ساختار صورت نمی‌گیرد [۱۲].

قدس و همکاران با بهره‌گیری از پیشرفت‌های فناوری نانو، به طراحی نانوحسگرهای پلاسمونیک مبتنی بر ساختارهای تناوبی دو بعدی با گیت‌های منطقی باندباریک پرداختند. در این پژوهش، ساختارهای متنوعی با استفاده از نانونوارهای فلزی و نانوشکاف‌ها طراحی و عملکرد حسگری آنها با تغییر هندسه و پارامترهای ساختاری بهبود یافت. اعمال ولتاژ به لایه‌ی نازک اکسید رسانای شفاف، قابلیت تنظیم‌پذیری، افزایش حساسیت و بهبود معیار شایستگی را فراهم نمود. همچنین، با تغییر زاویه‌ی تابش و اعمال ولتاژ به ساختار مبتنی بر کریستال مایع، حسگری قابل تنظیم ارائه شد. بیشترین حساسیت این حسگرها به مقدار 1125 RIU^{-1} نانومتر بر واحد ضریب شکست (nm/RIU) و معیار شایستگی RIU^{-1} حاصل گردید. کاربرد این حسگرها در زمینه‌ی هماتولوژی و تشخیص بیماری‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، یک نانوحسگر دما با استفاده از مواد دارای قابلیت تغییر فاز طراحی و شبیه‌سازی شد که قابلیت تشخیص دمای زخم و سطح پوست را دارا می‌باشد [۱۳].

پرمر و همکاران به طراحی و ساخت سامانه‌ی تولید بخار خورشیدی مبتنی بر لایه‌ای از گیت‌های منطقی حاوی نانوذرات پلاسمونیک (مس، طلا، نقره) و لایه‌های پلیمری عایق حرارتی پرداختند. در این سامانه، با استفاده از راهبرد محلی‌سازی گرما، حرارت در سطح متمرکز شده و بازده تبخیر بهبود می‌یابد. این رویکرد، پتانسیل بالایی در کاربردهای تولید نیرو، نمک‌زدایی و گرمایش مسکونی دارد [۱۴].

مددی یک گیت منطقی خورشیدی پهن‌بند مبتنی بر فرامواد پلاسمونیک با استفاده از فلز نیتريد تیتانیوم (TiN) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) ارائه نمود. در این ساختار، طول موج‌های کوتاه توسط دیسک‌ها و طول موج‌های بلند توسط حلقه‌های درون سلول جذب می‌شوند. با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان (FDTD)، نشان داده شد که این گیت در بازه‌ی ۲۰۰ تا ۴۰۰۰ نانومتر دارای میانگین جذب ۹۳٪ و در بازه‌ی ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر جذب نزدیک به واحد دارد. ساختار مذکور با ضخامت ۳۵۰ نانومتر و دوره‌تناوب ۲۴۰ نانومتر، نسبت به قطبش نور ورودی حساس نبوده و تا زاویه‌ی ۵۰ درجه، بیش از ۸۰٪ تابش خورشید را جذب می‌کند. استفاده از فلز دیرگداز TiN، این ساختار را برای کاربردهای خورشیدی با دمای بالا مناسب می‌سازد [۱۵].

لین و همکاران به بررسی نانوحسگرهای پلاسمونیک و نقش آنها در تشخیص تغییرات ضریب شکست، دما و ویژگی‌های مواد پرداختند. حسگرهای پلاسمونیک به دلیل حساسیت بالا، ضریب کیفیت مناسب و ابعاد کوچک، یکی از بهترین گزینه‌ها در حوزه‌ی نانوفوتونیک محسوب می‌شوند. در این پژوهش، تلاش شده است تا با بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری، حساسیت و دقت این حسگرها بهبود یابد تا کارایی آنها در زمینه‌های پزشکی، صنعت، تصویربرداری شیمیایی و مهندسی محیط‌زیست افزایش یابد [۱۶].

جین و همکاران یک گیت منطقی چهارنواره مبتنی بر گرافن با قابلیت تنظیم‌پذیری بالا و حساسیت زیاد ارائه دادند. ساختار پیشنهادی شامل دو لایه‌ی گرافن با الگوهای ال‌شکل و نانوحفره‌دار است که توسط یک

در پژوهش حاضر تحقیق پیرامون موضوع بررسی و بهینه‌سازی گیت‌های منطقی گرافین- فوتونیک کریستال، یکی از جنبه‌های جدید در حوزه الکترونیک و فیزیک است که به منظور افزایش سرعت و کارایی در پردازش اطلاعات و ارتباطات بین دستگاه‌ها و شبکه‌های الکترونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق، از تکنولوژی پلاسمونیک برای طراحی و ساخت گیت‌های منطقی استفاده می‌شود که باعث افزایش سرعت و کاهش انرژی مصرفی در پردازش اطلاعات می‌شود. به عبارت دیگر، این تحقیق به منظور بهبود عملکرد دستگاه‌های الکترونیک و افزایش کارایی آنها صورت می‌گیرد از طرف دیگر جنبه جدید این تحقیق در استفاده از شبکه عصبی پیشرو برای بهینه‌سازی گیت‌های منطقی پلاسمونیک است. این روش جدید و نوین، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری، قادر به بهبود عملکرد گیت‌های منطقی پلاسمونیک و کاهش خطا در عملکرد آنها می‌باشد. استفاده از شبکه عصبی پیشرو در بهینه‌سازی گیت‌های منطقی پلاسمونیک، باعث کاهش زمان و هزینه محاسبات نسبت به روش متعارف، به عبارتی صحیح و خطا که مستلزم تکرار شبیه‌سازی با تغییر پارامترهاست می‌گردد. با توجه به حساسیت پارامترهای طراحی از جمله: طول موج، دما، انرژی مصرفی و در نهایت ابعاد گیت پیاده‌سازی شده، رویکرد محققین پیشین در حذف برخی پارامترهای مهم طراحی به عدم دستیابی به طراحی یک گیت منطقی بهینه می‌انجامد، استفاده از شبکه عصبی محدودیت‌های پیشین را تا حدود زیادی از بین می‌برد، چرا که برای دستیابی به بهینه‌ترین حالت در خصوص انرژی مصرفی، دمای حداقلی، طول موج، ابعاد ساخت، سرعت اتصال بالا، قابل پیگیری بوده و در نتیجه آن، خروجی به‌دست‌آمده حالت بهینه را در کنار وجود کلیه پارامترهای اساسی دارا هست.

نوآوری پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب ترکیبی برای طراحی و بهینه‌سازی گیت‌های منطقی پلاسمونیک مبتنی بر گرافین- فوتونیک کریستال نهفته است؛ به‌گونه‌ای که شبیه‌سازی تمام‌موج الکترومغناطیسی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics با یک شبکه عصبی LSTM به‌عنوان مدل رگرسیون غیرخطی تلفیق می‌شود. در این چارچوب، پاسخ گیت برای ترکیب‌های مختلف پارامترهای هندسی و الکتریکی، به‌ویژه پتانسیل شیمیایی گرافین، استخراج شده و سپس شبکه آموزش‌دیده برای پیش‌بینی سریع عملکرد و شناسایی شرایط بهینه به‌کار گرفته می‌شود. برخلاف روش‌های متداول مبتنی بر آزمون و خطا و اجرای مکرر شبیه‌سازی‌ها، روش پیشنهادی امکان بررسی هم‌زمان پارامترهای اساسی طراحی، از جمله طول موج، پتانسیل شیمیایی، ابعاد ساختار، دمای کاری و مصرف انرژی را فراهم می‌کند. همچنین، در این پژوهش حالات منطقی گیت‌های AND و OR بر اساس کنترل الکتریکی پتانسیل شیمیایی گرافین و برای تمامی ترکیب‌های ورودی ارزیابی می‌شوند؛ از این‌رو، ساختار پیشنهادی علاوه بر قابلیت بازپیکربندی منطقی، زمینه را برای دستیابی به گیت‌هایی با ابعاد کوچک‌تر، سرعت عملکرد بالاتر، مصرف انرژی کمتر و زمان طراحی کوتاه‌تر فراهم می‌سازد.

۲- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی بهره‌گیری از ساختارهای پلاسمونیک و مواد پیشرفته نظیر گرافن برای طراحی گیت‌های منطقی، حسگرها و ادوات الکترونیکی انجام شده است. در ادامه، مروری بر مهم‌ترین این پژوهش‌ها ارائه می‌شود.

گوش و همکاران به طراحی گیت‌های منطقی الکترومغناطیسی مبتنی

نیازمند توان پردازشی و زمان محاسباتی بسیار زیادی هستند، این پژوهش نشان داد که آموزش شبکه‌های عصبی عمیق می‌تواند با دقت بسیار بالا پاسخ نوری ساختار را پیش‌بینی کرده و ابعاد بهینه هندسی را در کسری از ثانیه تعیین نماید؛ رویکردی که مسیر جدیدی را برای طراحی هوشمند گیت‌ها و موجبرهای پلاسمونیک هموار کرده است [۲۲].

۳- روش پژوهش

در این تحقیق، از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان ابزار اصلی تحلیل و بهینه‌سازی داده‌ها استفاده شده است. فرایند پژوهش شامل مراحل سیستماتیک طراحی معماری شبکه، پیش‌پردازش داده‌ها، آموزش، ارزیابی و بهینه‌سازی شبکه می‌باشد که در ادامه به تفکیک تشریح می‌شود.

۳-۱ طراحی معماری شبکه عصبی

در گام نخست، نیازمندی‌ها و مشخصات فنی گیت‌های منطقی و آشکارساز پلاسمونیک، از جمله تعداد و نوع گیت‌ها و همچنین ویژگی‌های عملکردی آشکارساز، مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس این نیازمندی‌ها، معماری شبکه عصبی شامل تعیین تعداد لایه‌ها، نوع هر لایه، تعداد واحدهای هر لایه و روش اتصال بین لایه‌ها طراحی گردید. در ادامه، به‌منظور ارزیابی عملکرد شبکه در حین آموزش، یک تابع هزینه مناسب بر اساس ویژگی‌های مسئله انتخاب شد.

۳-۲ پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های آموزشی مورد نیاز برای آموزش شبکه، شامل گیت‌های منطقی در وضعیت‌های مختلف به همراه خروجی‌های متناظر، گردآوری و ذخیره‌سازی شدند. سپس داده‌های آموزشی تحت فرایند پیش‌پردازش قرار گرفتند تا برای ورود به شبکه آماده شوند. این پیش‌پردازش شامل تبدیل داده‌ها به فرمت عددی مناسب (همانند ماتریس‌های عددی)، نرمال‌سازی مقادیر، حذف نویزهای احتمالی و اعمال روش‌های ویژگی‌بندی نظیر تبدیل One-Hot یا استخراج بردارهای ویژگی بود. همچنین، به‌منظور ارزیابی عملکرد شبکه و جلوگیری از پدیده‌ی برازش زیاد، داده‌ها به دو مجموعه‌ی آموزش و اعتبارسنجی تفکیک شدند.

۳-۳ آموزش شبکه عصبی

داده‌های آموزشی به دو بخش مجزا برای آموزش و ارزیابی عملکرد شبکه در طول فرایند آموزش تقسیم شدند. فرایند آموزش شامل ارسال داده‌های ورودی به شبکه، محاسبه‌ی خروجی، محاسبه‌ی خطای هزینه با استفاده از تابع هزینه‌ی تعیین‌شده، و به‌روزرسانی وزن‌ها و پارامترهای شبکه از طریق الگوریتم بهینه‌سازی بود. در پایان هر دوره‌ی آموزشی^۵ عملکرد شبکه با استفاده از داده‌های ارزیابی مورد سنجش قرار گرفت و معیارهایی نظیر دقت، صحت و ماتریس درهم‌ریختگی محاسبه گردید.

۳-۴ بهینه‌سازی شبکه

در صورت عدم دستیابی به عملکرد مطلوب، پارامترهای شبکه از طریق تنظیم اندازه و نوع لایه‌ها، تعداد واحدهای هر لایه و یا تغییر تابع هزینه، بهینه‌سازی شدند. همچنین، امکان تغییر الگوریتم بهینه‌سازی از میان

لایه‌ی دی‌الکترونیک از یکدیگر جدا شده و بر روی زیرلایه‌ی دی‌الکترونیک-طلا قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی با روش FDTD نشان داد که این ساختار دارای چهار قله‌ی جذب کامل یا نزدیک به کامل در طول‌موج‌های ۴۷/۹، ۳۱/۱۰، ۹۳/۱۳ و ۸۱/۱۸ میکرومتر با مقادیر جذب به‌ترتیب ۱۰۰٪، ۹۳٪، ۹۷٪ و ۹۶٪ است. با تغییر انرژی فرمی و پارامترهای هندسی، قله‌های جذب به‌طور مستقل قابل تنظیم هستند. بیشترین حساسیت^۱ (S) معادل ۸۶/۱۲ (μm)/RIU و بیشترین معیار شایستگی^۲ (FoM) برابر ۹۰/۴۹ به‌دست آمد که نسبت به بسیاری از پژوهش‌های پیشین برتری دارد [۱۷].

لو و همکاران به بررسی استفاده از پلاسمونیک به‌عنوان گیت‌های منطقی اشباع‌پذیر در لیزرهای فیبری پرداختند. با توجه به اینکه پژوهش‌های پیشین عمدتاً آزمایشگاهی بوده و شبیه‌سازی جامعی ارائه نشده بود، این تحقیق به شبیه‌سازی اثرات نانوآستوانه‌های پلاسمونیک در لیزر فیبری اختصاص یافت. نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی، عملکرد مطلوب پلاسمونیک را به‌عنوان گیت اشباع‌پذیر تأیید نمود و پدیده‌ی دوپایداری نوری که در کلیدزنی نوری حائز اهمیت است، نیز مشاهده شد [۱۸].

وو و با بهره‌گیری از خواص استثنایی الکترونیکی، حرارتی و نوری گرافن، یک فیلتر پلاسمونیک تنظیم‌پذیر مبتنی بر گرافن در حوزه‌ی تراهرتز ارائه داد. ساختار پیشنهادی دارای سه مود در فرکانس‌های ۷۷/۱۴، ۱۵/۱۷ و ۷۸/۱۸ تراهرتز با مقادیر انتقال به‌ترتیب ۹۱۵/۰، ۴۵/۰ و ۳۱/۰ است. این فیلتر با تغییر پارامترهای ساختاری، فواصل اتصال و پتانسیل شیمیایی قابل تنظیم است. شبیه‌سازی‌ها با روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان^۳ (FDTD) و به‌صورت سه‌بعدی توسط نرم‌افزار لومریکال انجام شده و شرایط مرزی کاملاً جاذب اعمال گردیده است [۱۹].

سو و همکاران به بررسی و طراحی گیت‌های منطقی تمام‌نوری در حوزه تراهرتز با استفاده از تشدیدکننده‌های حلقوی مستطیلی مبتنی بر نانوآلارهای گرافین پرداختند. در این ساختار، با بهره‌گیری از پدیده تداخل پلاسمون‌های سطحی و تنظیم هدایت سطحی گرافین از طریق پتانسیل شیمیایی، موفق به تحقق گیت‌های منطقی پایه نظیر AND، OR و NOT در فرکانس‌های تراهرتز شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ساختار دارای نسبت خاموشی مناسب و پاسخ زمانی بسیار سریعی در مقایسه پیکونانیه است که پتانسیل بالای گرافین را در مدارهای پردازش سیگنال فوق‌سریع اثبات می‌کند [۲۰].

دن و همکاران رویکرد جدیدی برای پیاده‌سازی انواع گیت‌های منطقی نوری با استفاده از متاسطح‌های کدگذاری‌شده پلاسمونیک ارائه دادند. در این پژوهش، کنترل فاز و دامنه امواج بازتابی و عبوری از طریق بازآرایی نانوآلارهای فوتونیک بررسی شد. نتایج نشان داد که با مهندسی توزیع مکانی فاز ناشی از تغییرات ساختاری، می‌توان گیت‌های منطقی جهانی را با نسبت کنتراست بالا و اتلاف نوری اندک در ابعاد بسیار فشرده محقق ساخت [۲۱].

ژنگ و همکاران به بررسی کاربرد الگوریتم‌های یادگیری عمیق و بهینه‌سازی تکاملی در طراحی معکوس و سریع نانوآلارهای فوتونیک و متاسطح‌ها پرداختند. با توجه به اینکه روش‌های مرسوم شبیه‌سازی تمام‌موج (نظیر FEM^۴ و FDTD) برای بهینه‌سازی پارامترهای چندگانه

1. Sensitivity
2. Figure-of-Merit
3. Finite-Difference Time-Domain
4. Finite Element Method

گرادیان شدید میدان در فصل مشترک، حداکثر ابعاد المان‌ها در مرزهای فلز-دی‌الکتریک و شکاف‌های کوپلینگ برابر 2 nm و در سایر نواحی دامنه برابر 15 nm تعیین شده است تا دقت شبیه‌سازی و استقلال پاسخ از مش تضمین گردد. در نهایت، ضریب انتقال توان (T) از انتگرال‌گیری مؤلفه عمودی بردار پوینتینگ در پورت خروجی محاسبه می‌شود.

۳-۸ معادله‌های ماکسول و انتشار موج الکترومغناطیسی

اثر متقابل فلزات با میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند به صورت کلاسیک بر اساس معادله‌های ماکسول کاملاً توصیف شود. از آنجایی که چگالی بالای حامل‌های آزاد منجر کوچک شدن فضای سطوح انرژی الکترون‌ها مقایسه با تحریک انرژی گرمایی $k_B T$ در دمای اتاق می‌شود، بنابراین حتی نانو ساختارهای فلزی بسیار کوچک از مرتبه چند نانومتر هم نیازی به استفاده از مکانیک کوانتومی برای توصیف ندارند.

برای فرکانس‌های تا حد مرئی، فلزات بسیار بازتابنده هستند و اجازه نمی‌دهند امواج الکترومغناطیسی از طریق آنها انتشار یابد. از این رو از فلزات به عنوان لایه محافظ در ساخت موجبرها و تشدیدکننده‌ها در فرکانس‌های میکروویو و فروسرخ دور استفاده می‌شود. در این محدوده فرکانسی پایین، تقریب رسانای خوب یا کامل با رسانایی ثابت محدود یا نامحدود، برای بیشتر مقاصد معتبر است، چرا که فقط بخش ناچیزی از امواج الکترومغناطیسی، به داخل فلز نفوذ می‌کند. در فرکانس‌های فروسرخ نزدیک و مرئی، نفوذ میدان افزایش می‌یابد که این امر باعث اتلاف (پراکندگی) می‌شود، و مقیاس‌بندی دستگاه‌های فوتونی با روش‌های ساده که به خوبی در فرکانس‌های پایین این ناحیه کار می‌کردند، امکان‌پذیر نیست. در فرکانس‌های فرابنفش، مشخصات فلزات مشابه دی-الکتریک می‌شود و امواج الکترومغناطیسی می‌تواند درون آنها انتشار یابد [۲۳].

قبل از ارائه توضیحاتی در مورد خواص نوری فلزات، یادآوری می‌شود که معادله‌های اساسی حاکم بر پاسخ الکترومغناطیسی فلزات، معادله‌های ماکسول ماکروسکوپی است. به این معنی که جزئیات برهمکنش اساسی بین ذرات باردار داخل محیط و میدان‌های الکترومغناطیسی در نظر گرفته نمی‌شوند.

معادله‌های ماکسول ماکروسکوپی برابر است با [۲۴]:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4)$$

این معادله‌ها ارتباط بین بردارهای چگالی شار الکتریکی (D)، میدان الکتریکی (E)، میدان مغناطیسی (H) و چگالی شار مغناطیسی (B) با چگالی‌های حجمی بار (ρ) و چگالی جریان حجمی (J) را نشان می‌دهد.

ارتباط بین بردارهای E, D, H و B به وسیله بردارهای قطبش الکتریکی (P) و مغناطیسی (M) به صورت زیر است [۲۵]:

$$D = \epsilon E + P \quad (5)$$

$$H = \frac{1}{\mu} B - M \quad (6)$$

که در آن ϵ و μ به ترتیب ضریب‌های گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری

روش‌هایی نظیر گرادیان کاهشی^۱، RMSprop^۲، Adam^۳ و همچنین الگوریتم‌های بازگشتی مانند RNN^۴ و حافظه کوتاه‌مدت ماندگار^۵ (LSTM) فراهم گردید. به منظور مقابله با پدیده‌های برازش زیاد^۶ یا برازش کم^۷، از تکنیک‌های منظم‌سازی^۸، حذف تصادفی^۹ و هنجارسازی هنجارسازی دسته‌ای^{۱۰} استفاده شد.

۳-۵ تنظیم فرایارامترها

به منظور دستیابی به عملکرد بهینه، فرایارامترهای شبکه شامل تعداد دوره‌های آموزش، اندازه‌ی دسته‌های داده^{۱۱} و نرخ یادگیری^{۱۲} تنظیم شدند. در این فرایند، در صورت همگرایی سریع و نامطلوب شبکه، نرخ یادگیری کاهش یافت و در صورت عدم بهبود عملکرد، نرخ یادگیری افزایش داده شد. همچنین تعداد دوره‌ها و اندازه‌ی دسته‌ها به صورت آزمایشی تنظیم گردید تا بهترین نتیجه حاصل شود.

۳-۶ تکرار و بهبود عملکرد

مراحل آموزش، بهینه‌سازی و تنظیم فرایارامترها (مراحل ۳ تا ۵) به صورت چرخه‌ای و مبتنی بر نتایج ارزیابی، تکرار شدند. این فرایند بازخوردی تا حصول به عملکرد مطلوب و دستیابی به دقت و کارایی قابل قبول ادامه یافت.

۳-۷ جزئیات و تنظیمات شبیه‌سازی عددی در کامسول

شبیه‌سازی و تحلیل الکترومغناطیسی ساختارهای پلاسمونیک پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics بر پایه روش المان محدود (FEM) در حوزه فرکانس انجام شده است. به منظور حل معادلات ماکسول و تعیین رفتار انتشار پلاسمون‌های سطحی^{۱۳} (SPP)، لایه‌های جاذب تطبیق کامل^{۱۴} (PML) با ضخامت بهینه 500 nm در گردگرد دامنه محاسباتی اعمال شده‌اند تا از هرگونه بازتاب مصنوعی امواج در مرزها جلوگیری شود.

در مدل‌سازی مواد، پاسخ اپتیکی و گذردهی دی‌الکتریک نقره (Ag) بر اساس داده‌های تجربی مدل کریستی و جانسون تنظیم گردیده که در طول موج کاری 1310 nm برابر $\epsilon_{Ag} = -86.95 + 8.35i$ است و برای محیط دی‌الکتریک (سیلیکا) ضریب شکست $n = 1.40$ لحاظ شده است. تحریک در پورت‌های ورودی از طریق انتشار مد پایه‌ای مغناطیسی عرضی (TM-mode) با توان ورودی $P_{in} = 9.3 \times 10^{-11}\text{ W}/\mu\text{m}$ به موجبرهای MIM اعمال می‌شود.

مش‌بندی دامنه با المان‌های مثلثی در سطح Extremely Fine ایجاد شده است. با توجه به نفوذ میدان در عمق پوستی فلز ($\sim 22\text{ nm}$) و

1. Gradient Descent
2. Root Mean Square Propagation
3. Adaptive Moment Estimation
4. Recurrent Neural Network
5. Long Short-Term Memory
6. Overfitting
7. Underfitting
8. Regularization
9. Dropout
10. Batch Normalization
11. Batch Size
12. Learning Rate
13. Surface Plasmon Polaritons
14. Perfectly Matched Layers

(L)، از یک چارچوب مبتنی بر شبکه عصبی حافظه کوتاه مدت طولانی (LSTM) استفاده شده است. مجموعه داده‌های آموزشی شامل ۵۰۰ نمونه حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی FEM است که به سه بخش آموزش (۷۰٪)، اعتبارسنجی (۱۵٪) و آزمون (۱۵٪) تقسیم شده‌اند. ورودی‌ها در بازه [۰, ۱]، هنجارسازی شده و معماری شبکه شامل لایه‌های LSTM برای استخراج روابط پیچیده غیرخطی و به دنبال آن لایه‌های متراکم با تابع فعال‌ساز ReLU در لایه‌های پنهان و فعال‌ساز خطی در لایه خروجی رگرسیون می‌باشد.

آموزش مدل با استفاده از بهینه‌ساز Adam، نرخ یادگیری $\alpha = 0.001$ ، و حداکثر ۵۰۰ دوره^۱ با اعمال مکانیزم توقف زودهنگام^۲ (با صبر ۳۰ دوره) جهت جلوگیری از بیش‌برازش انجام شد. نتایج ارزیابی نشان داد که استفاده از ساختار LSTM دقت برازش را به‌طور محسوسی ارتقا می‌دهد؛ به‌طوری‌که ضریب تعیین (R^2) در مدل‌سازی گیت AND از ۰/۵۴ به ۰/۷۹ (با کاهش خطای RMSE از ۸۳۸.۸۶ به ۶۵۲.۶۶) و در گیت OR از ۰/۵۱ به ۰/۷۴ بهبود یافته است.

۴- آنالیز و بحث

۴-۱ نتایج عددی رسانی گرافین

در این قسمت با حل معادلات کوبو، نمودار قسمت‌های حقیقی و موهومی گرافین را به‌ازای مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی در فرکانس‌های مختلف خواهیم دید. برای حل عددی رسانی گرافین بر اساس فرمول کوبو نرخ پراکندگی $D = 2T$ Hz فرض می‌شود.

ممکن است در ناحیه‌ای از فرکانس و پتانسیل شیمیایی $\text{Im}(\sigma) < 0$ باشد، برای بقیه قسمت‌ها مقدار رسانی $\text{Im}(\sigma) > 0$ است. به ازای $\text{Im}(\sigma) > 0$ ، گرافین مانند لایه‌ای نازک از فلز عمل کرده و می‌تواند پذیرای امواج TM پلاسمون پلاریتون‌های سطحی باشد.

در شکل‌های ۱ و ۲ قسمت موهومی و حقیقی رسانی گرافین بر حسب تغییرات فرکانس و پتانسیل شیمیایی که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرند، نشان داده شده است. قسمت حقیقی ضریب گذردهی الکتریکی گرافین با توجه به قسمت موهومی رسانی تعیین می‌شود. وقتی قسمت حقیقی ضریب گذردهی منفی باشد گرافین به‌صورت لایه نازکی از فلز عمل می‌کند و می‌تواند امواج پلاسمون سطحی TM را هدایت کند.

در شکل ۳ سهم گذارهای درون باندی و گذارهای بین‌باندی را در رسانی گرافین مشاهده می‌کنیم. این شکل برای دمای اتاق در فرکانس ۳۰ تراهرتز رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، وقتی که پتانسیل شیمیایی زیاد می‌شود سهم گذارهای بین‌باندی در رسانی بسیار کم است. تلفات ناشی از گذارهای بین‌باندی بسیار بیشتر از مقدار تلفات درون باندی است و این در حالی است که با بالا رفتن پتانسیل شیمیایی تلفات بین‌باندی به‌کلی از بین رفته و تلفات درون باندی مقدار رو به افزایشی را خواهد داشت. پس رسانی گرافین تقریباً ناشی از گذارهای درون باندی است.

۴-۲ طراحی موجبر گرافین فوتونیک کریستال

فوتونیک کریستال یک‌بعدی به‌صورت یک ماده ناهمسانگرد عمل می‌کند و می‌تواند در جهت مختلف ضریب گذردهی الکتریکی متفاوتی از

مغناطیسی خلاء هستند.

از آنجایی که در اینجا تنها رفتار محیط غیرمغناطیسی بررسی می‌شود، فقط قطبش الکتریکی در نظر گرفته می‌شود.

با در نظر گرفتن رابطه $\nabla \cdot P = -\rho$ و معادله پیوستگی $\nabla \cdot J = -\partial \rho / \partial t$ رابطه بین چگالی جریان حجمی و بردار قطبش الکتریکی برابر است با [۳]

$$J = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (7)$$

مزیت این روش این است که میدان الکتریکی ماکروسکوپی شامل همه اثرات قطبی‌شدگی است. به عبارت دیگر میدان‌های خارجی و القاء شده در درون آن به‌خودی‌خود محاسبه می‌شوند که آن را با جایگذاری (۵) در (۱) می‌توان نشان داد

$$\nabla \times E = -\frac{\rho_{tot}}{\epsilon} \quad (8)$$

که ρ_{tot} چگالی حجمی کل بار است و از مجموع چگالی حجمی بارهای خارجی و داخلی به‌دست می‌آید. با در نظر گرفتن یک محیط خطی، همسانگرد و غیرمغناطیسی چگالی‌های شار الکتریکی و مغناطیسی به‌صورت زیر است [۲۶]:

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad (9)$$

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (10)$$

که ϵ_r ثابت دی‌الکتریک نام دارد و $\mu_r = 1$ ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی محیط غیرمغناطیسی است. رابطه خطی (۹) بین E و D اغلب با استفاده از ضریب حساسیت الکتریکی (χ) (به‌خصوص در رفتار مکانیک کوانتومی پاسخ نوری) تعریف می‌شود که رابطه خطی بین E و P را از طریق معادله زیر توصیف می‌کند [۲۷]:

$$P = \epsilon_r \chi E \quad (11)$$

که با قرار دادن (۵) و (۱۱) در (۹) به‌دست می‌آید. رابطه بین چگالی جریان حجمی (J) و میدان الکتریکی (E) با ضریب رسانندگی (σ) مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$J = \sigma E \quad (12)$$

از آنجایی که پاسخ نوری فلزات به‌وضوح به فرکانس بستگی دارد، روابط خطی (۹) و (۱۲) برابر می‌شوند با [۲۷]:

$$D(r, t) = \epsilon_r \iint \epsilon_r(r - r', t - t') E(r', t) dt dr' \quad (13)$$

$$J(r, t) = \iint \sigma(r - r', t - t') E(r', t) dt dr' \quad (14)$$

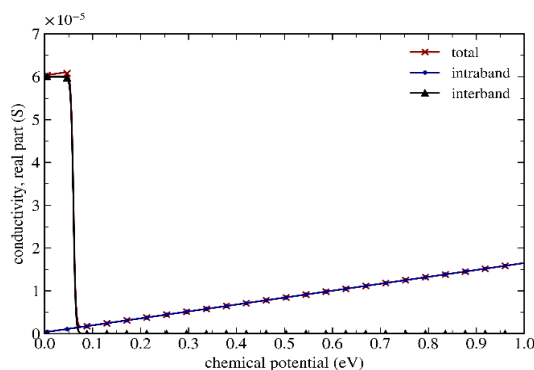
که ϵ_r و σ پاسخ ضربه رابطه خطی مربوطه هستند. با توجه به اینکه همه مقیاس‌های طول به‌طور قابل توجهی بزرگتر از ثابت شبکه ماده است، یعنی محیط همگن فرض شده است، توابع پاسخ ضربه به مختصات مطلق مکانی و زمانی بستگی ندارند، و فقط به تفاوت آنها وابسته هستند.

۳-۹ جزئیات پیاده‌سازی شبکه عصبی و مدل LSTM

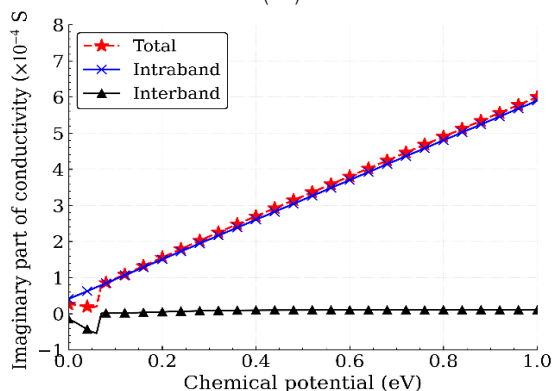
به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی گیت‌های منطقی (نسبت کنتراست CR و تلفات عبوری IL) بر اساس متغیرهای هندسی ساختار (عرض موجبر w ، فاصله کوپلینگ g و طول رزوناتور

1. Epoch

2. Early Stopping

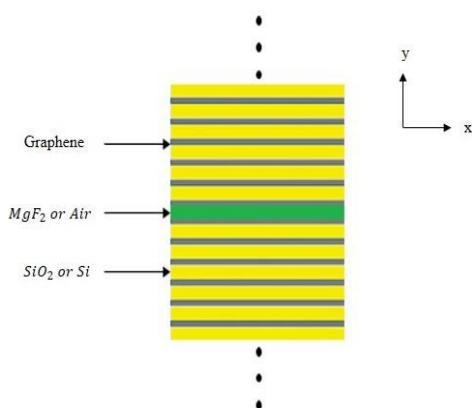


(الف)



(ب)

شکل ۳: سهم ناشی از گذارهای درون باندی و گذارهای بین‌باندی (الف) برای قسمت حقیقی رسانایی (ب) برای قسمت موهومی رسانایی.



شکل ۴: ساختار پیشنهاد شده برای موجبر پلاسمونی.

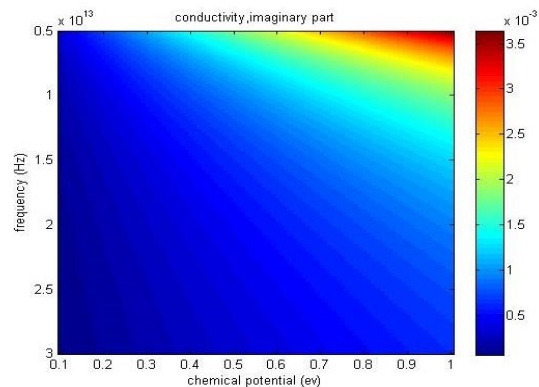
۴-۲-۱ تأثیر پارامترهای ساختار بر طول انتشار و محصورشدگی موج پلاسمون

در این قسمت محصورشدگی و طول انتشار موج پلاسمون را رسم خواهیم کرد و تغییر پارامترهای ساختار مانند جنس دی‌الکتریک پوشش، تعداد لایه‌های گرافین، ضخامت هسته، جنس هسته و پتانسیل شیمیایی گرافین را بر طول انتشار و محصورشدگی موج پلاسمون بررسی می‌کنیم.

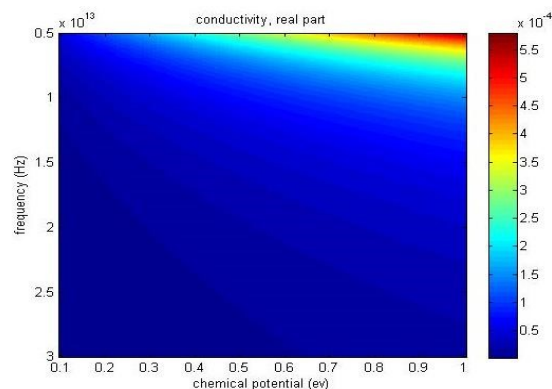
۴-۲-۲ تأثیر جنس دی‌الکتریک پوشش

در اینجا برای دی‌الکتریک پوشش دو ماده سیلیکون با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_{Si} = 11.68$ و دیاکسید سیلیکون با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_{SiO_2} = 3.9$ را استفاده می‌کنیم.

شکل ۵: قسمت حقیقی ضریب گذردهی پوشش بر حسب فرکانس برای مقادیر مختلف پرشدگی.



شکل ۱: قسمت موهومی رسانایی گرافین بر حسب فرکانس و پتانسیل شیمیایی.



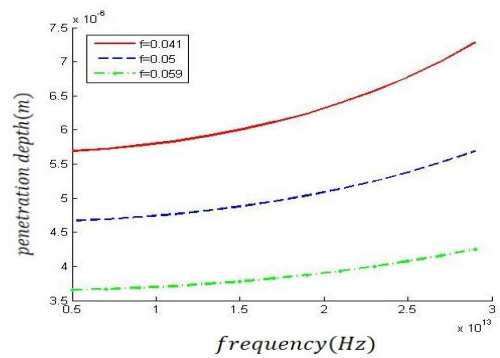
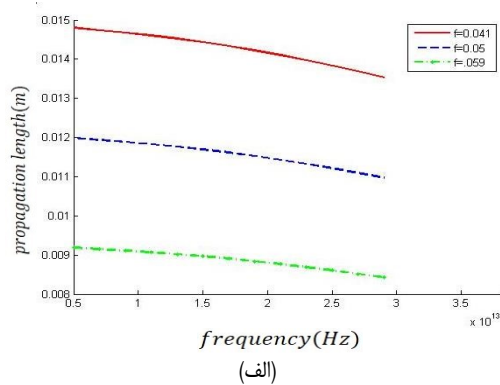
شکل ۲: قسمت حقیقی رسانایی گرافین بر حسب فرکانس و پتانسیل شیمیایی.

خود نشان دهد و همچنین مشاهده شد که استفاده از ساختار ناهمسانگرد برای پوشش موجبر قابلیت بهبود پارامترهای محصورشدگی و افزایش طول انتشار موج پلاسمون را دارد. ساختار پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است.

موجبر پیشنهادی به صورت یک موجبر سه لایه است. که شامل هسته با ضریب گذردهی الکتریکی ϵ_c و پوشش فوتونیک کریستال یکبندی است. فوتونیک کریستال یکبندی پوشش بصورت یک ماده ناهمسانگرد عمل می‌کند و از دو لایه گرافین و دی‌الکتریک بصورت متناوب برای ساخت آن استفاده شده است. ϵ_x ضریب گذردهی الکتریکی پوشش در راستای x (موازی) و ϵ_y ضریب گذردهی الکتریکی پوشش در راستای y (عمود) است.

در شبیه‌سازی‌ها ضخامت گرافین ۰/۵ نانومتر در نظر گرفته شده است. در این تحقیق تمام نمودارها برای مقادیر مختلف پرشدگی رسم شده است، یعنی ضخامت دی‌الکتریک پوشش را تغییر می‌دهیم و به ازای نسبت پرشدگی گرافین به دی‌الکتریک نمودارها را رسم می‌کنیم.

در شکل‌های ۵ و ۶ قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی پوشش را بر حسب فرکانس برای مقادیر مختلف پرشدگی رسم می‌کنیم. این دو شکل برای سه مقدار پرشدگی مختلف $f = 0.41, 0.5, 0.59$ و ضریب گذردهی الکتریکی دی‌الکتریک پوشش، $\epsilon_d = 11.68$ (سیلیکون) و گرافین تک‌لایه با پتانسیل شیمیایی $\mu = 0.5 \text{ eV}$ در فرکانس‌های مختلف رسم شده است. همانطور که از شکل‌ها مشخص می‌شود قسمت حقیقی ضریب گذردهی الکتریکی پوشش منفی است و پوشش رفتاری مانند فلز دارد، در نتیجه مرز مشترک هسته و پوشش می‌تواند بستر امواج پلاسمون باشد. با تغییر مقدار پرشدگی ضریب گذردهی الکتریکی پوشش تغییر می‌کند و در نتیجه رفتار پوشش نیز تغییر می‌کند. پس با تنظیم مقدار پرشدگی می‌توان محصورشدگی و طول انتشار را تنظیم کرد.



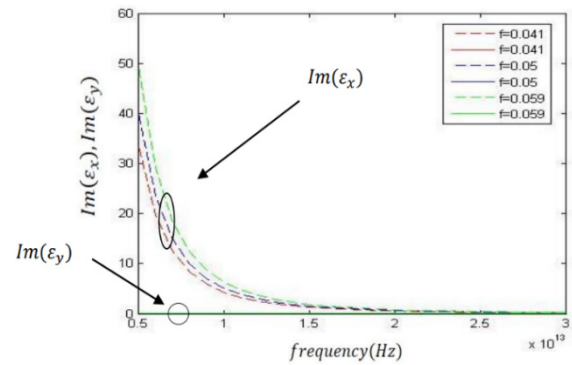
(ب)

شکل ۸: طول انتشار (الف) و عمق نفوذ (ب) بر حسب فرکانس با تغییر مقدار پخش برای دی الکتریک پوشش از جنس دی اکسید سیلیکون.

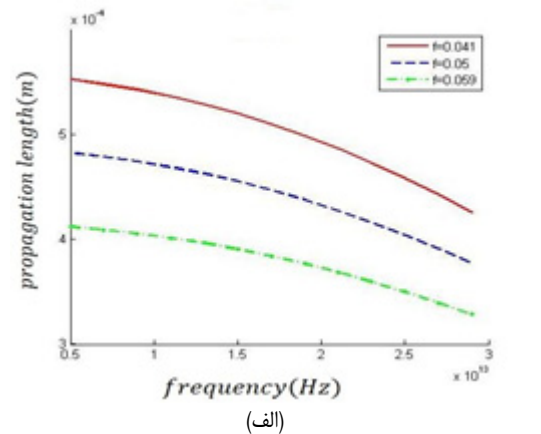
به خوبی عمل نمی کند و مد در ناحیه وسیع پخش می شود. در کل به دلیل محصورشدگی بهتر سیلیکون نسبت به دی اکسید سیلیکون می توان نتیجه گرفت که سیلیکون گزینه مناسب تری برای طراحی موجبر است. در اینجا به جای استفاده از گرافین تک لایه از گرافین سه لایه استفاده می کنیم و نمودارهای طول انتشار و محصورشدگی را با همان مقدار قبلی ضخامت دی الکتریک پوشش رسم می کنیم. طبیعتاً چون ضخامت گرافین در حالت سه لایه ۱/۵ نانومتر است مقدار پخش دی الکتریک نسبت به دی الکتریک پوشش تغییر می کند. در شکل ۹ گرافین سه لایه با ضخامت ۱/۵ نانومتر با پتانسیل شیمیایی $\mu = 0.5 \text{ eV}$ و هسته دی الکتریک از جنس MgF_2 با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_c = 1.88$ و با ضخامت ۵۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته است. دی الکتریک استفاده شده در پوشش سیلیکون است.

باتوجه به شکل ۹، با افزایش فرکانس طول انتشار موج پلاسمون کمتر و محصورشدگی موج پلاسمون هم مقداری کمتر می شود و نسبت به حالتی که از گرافین تک لایه استفاده کردیم هم محصورشدگی هم طول انتشار بهبود یافته است. پس استفاده از گرافین سه لایه به تک لایه ترجیح داده می شود.

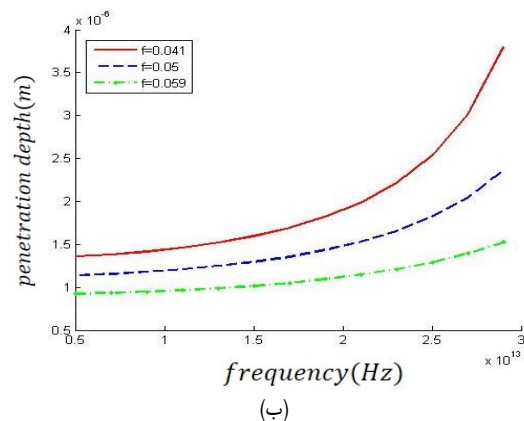
هنگامی که تعداد لایه های گرافین کمتر از ۶ لایه باشند معادلات استفاده شده برای گرافین مانند گرافین تک لایه است و رسانایی گرافین چند لایه را می توان از جمع چند گرافین تک لایه به دست آورد و از اثرات لایه های گرافین بر همدیگر صرف نظر کرد. اما در حالتی که تعداد لایه ها بیشتر باشد رسانایی به راحتی از برهم نهی چند تک لایه گرافین به دست نمی آید و گرافین بیش از ۶ لایه قابلیت تولید امواج پلاسمون را ندارد. برای حالت گرافین سه لایه ابتدا رسانایی را برای گرافین تک لایه حساب می کنیم و این رسانایی را سه برابر می کنیم و از روی این رسانایی سه برابر شده ضریب گذردهی الکتریکی گرافین را محاسبه می کنیم.



شکل ۶: قسمت موهومی ضریب گذردهی پوشش بر حسب فرکانس برای مقادیر مختلف پخش دی الکتریک.



(الف)

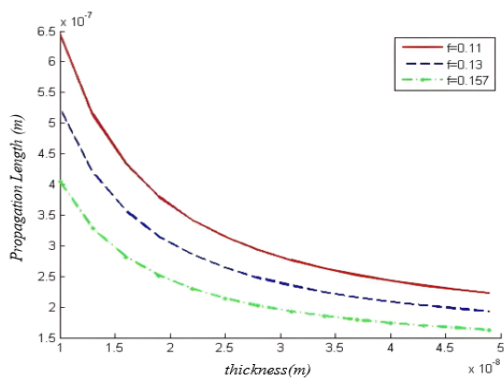


(ب)

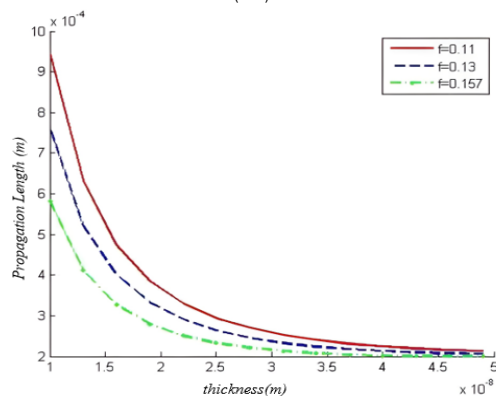
شکل ۷: طول انتشار (الف) و عمق نفوذ (ب) بر حسب فرکانس با تغییر مقدار پخش برای دی الکتریک پوشش از جنس سیلیکون.

در شکل های ۷ و ۸ گرافین تک لایه با ضخامت ۰/۵ نانومتر و با پتانسیل شیمیایی $\mu = 0.5 \text{ eV}$ و هسته دی الکتریک از جنس MgF_2 با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_c = 1.88$ و با ضخامت ۵۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته است. نمودار طول انتشار و محصورشدگی را به ازای فرکانسهای مختلف با تغییر مقدار پخش دی الکتریک می توان ملاحظه کرد. با توجه به نمودارهای محصورشدگی و طول انتشار می توان دید که برای دی الکتریک پوشش از جنس سیلیکون طول انتشار کمتر اما محصورشدگی بهتری نسبت به دی الکتریک پوشش از جنس دی اکسید سیلیکون داریم. طول انتشار برای دی اکسید سیلیکون تقریباً ۲۰ برابر و محصورشدگی ۰/۲ برابر سیلیکون است.

با افزایش فرکانس برای هر دو ماده سیلیکون و دی اکسید سیلیکون طول انتشار و محصورشدگی موج پلاسمون کمتر می شود. در واقع برای فرکانس های بالاتر از ۳۰ تراهرتز به دلیل کاهش محصورشدگی، موجبر



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: طول انتشار (الف) و عمق نفوذ (ب) بر حسب ضخامت هسته با تغییر مقدار پخشگی برای گرافین سه‌لایه.

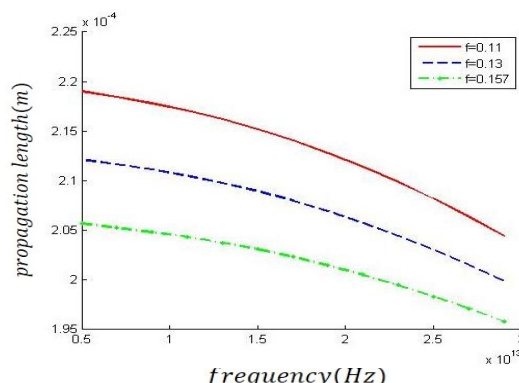
مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود با افزایش فرکانس طول انتشار کم شده و محصورشدگی مقداری کاهش می‌یابد. با مقایسه این شکل با شکل ۹ که برای هسته MgF_2 رسم شده است، ملاحظه می‌شود که طول انتشار تغییر چندانی نداشته؛ اما محصورشدگی بهبود یافته است. پس استفاده از هسته‌ای با جنس هوا بهتر است. اما استفاده از هسته با جنس MgF_2 از لحاظ ساخت ساده‌تر است و نکته قابل توجه دیگر در این نمودار بیشتر شدن طول انتشار با بیشتر شدن درصد پخشگی گرافین است. در تمامی نمودارهای قبلی طول انتشار با افزایش درصد پخشگی کم می‌شد؛ اما در اینجا موجبر برعکس عمل می‌کند. در واقع در یک فرکانس می‌توان برای یک مقدار پخشگی طول انتشار بیشتری داشت و با تغییر فرکانس در مقدار پخشگی دیگری طول انتشار بیشتری به دست آورد.

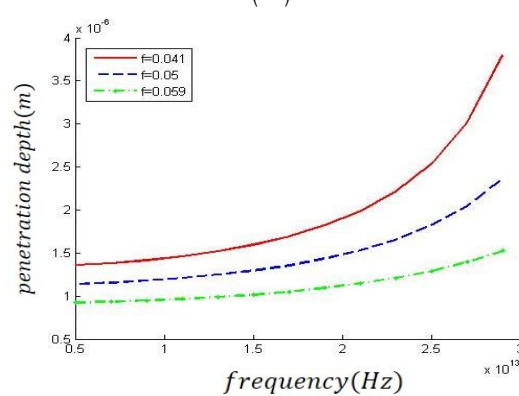
۴-۲-۵- تنظیم‌پذیری موجبر توسط تغییر پتانسیل شیمیایی گرافین

در بخش‌های قبل تأثیر ساختار فیزیکی موجبر بر روی طول انتشار و محصورشدگی موج پلاسمون بررسی شد. اما یکی از مزیت‌های این ساختار استفاده از گرافین برای تنظیم طول انتشار و محصورشدگی است. در واقع با اعمال ولتاژ به گرافین می‌توان پتانسیل شیمیایی آن را تغییر داد. تراز فرمی در گرافین خالص در محل نقاط دیراک قرار می‌گیرد، اما مواردی چون آلایش، میدان مغناطیسی و اعمال ولتاژ می‌تواند این تراز را به سمت بالا یا پایین جابه‌جا کند.

برای بررسی تأثیرات پتانسیل شیمیایی از گرافین سه‌لایه با ضخامت $1/5$ نانومتر پتانسیل شیمیایی $\mu = 0.5 \text{ eV}$ و هسته دی‌الکتریک از جنس MgF_2 با ضریب گذردهی الکتریکی $1/88$ و دی‌الکتریک از جنس سیلیکون در پوشش استفاده شده است. ضخامت هسته 10 نانومتر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲ پتانسیل شیمیایی گرافین را از 0.4 eV تا



(الف)



(ب)

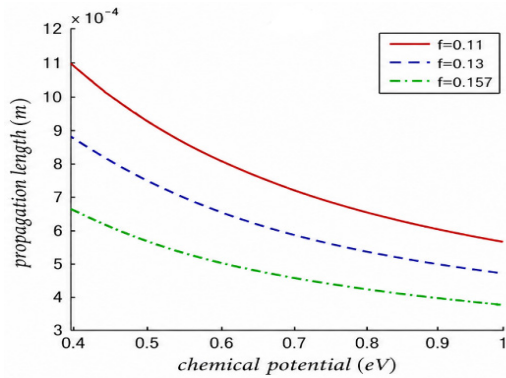
شکل ۹: طول انتشار (الف) و عمق نفوذ (ب) بر حسب فرکانس با تغییر مقدار پخشگی برای گرافین سه‌لایه.

۴-۲-۴- تأثیر ضخامت و جنس هسته

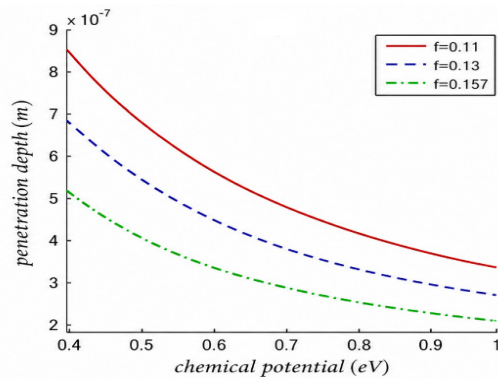
ابتدا تأثیر ضخامت هسته بررسی می‌شود. در اینجا از گرافین سه‌لایه با ضخامت $1/5$ نانومتر با پتانسیل شیمیایی $\mu = 0.5 \text{ eV}$ و هسته دی‌الکتریک از جنس MgF_2 با ضریب گذردهی الکتریکی $1/88$ استفاده شده است. دی‌الکتریک استفاده شده در پوشش، سیلیکون است. ضخامت هسته از 10 تا 50 نانومتر تغییر داده می‌شود و تأثیر آن را بر طول انتشار و محصورشدگی در فرکانس 20 تراهرتز مشاهده می‌کنیم. در شکل ۱۰ وابستگی طول انتشار و محصورشدگی موج پلاسمون به ضخامت دی‌الکتریک هسته در مقادیر مختلف پخشگی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت هسته از 10 نانومتر به 50 نانومتر طول انتشار موج پلاسمون کم می‌شود؛ اما محصورشدگی بهبود می‌یابد.

و مشاهده می‌شود که تغییر ضخامت هسته تأثیر زیادی در طول انتشار و محصورشدگی دارد. اگر طول انتشار بالا مورد نیاز باشد باید ضخامت هسته را کوچک گرفت در این صورت مد در ناحیه وسیع پراکنده می‌شود. برای حالتی که محصورشدگی بالا مدنظر است می‌توان ضخامت هسته را بیشتر در نظر گرفت، هر چه هسته موجبر بزرگ‌تر باشد توانایی هدایت مدهای بیشتری را دارد. اما باید به این نکته توجه داشت که افزایش ضخامت هسته باعث بزرگ‌تر شدن ساختار می‌شود.

حال به بررسی تأثیر جنس هسته می‌پردازیم. جنس هسته را از MgF_2 با ضریب گذردهی الکتریکی $1/88$ به هوا با ضریب گذردهی الکتریکی $\epsilon_{air} = 1$ تغییر می‌دهیم. از گرافین سه‌لایه با ضخامت $1/5$ نانومتر با پتانسیل شیمیایی $\mu = 0.5 \text{ eV}$ و دی‌الکتریک پوشش سیلیکون استفاده می‌کنیم. ضخامت هسته را 50 نانومتر در نظر می‌گیریم. نمودارهای محصورشدگی و طول انتشار به ازای پارامترهای ذکر شده در شکل ۱۱

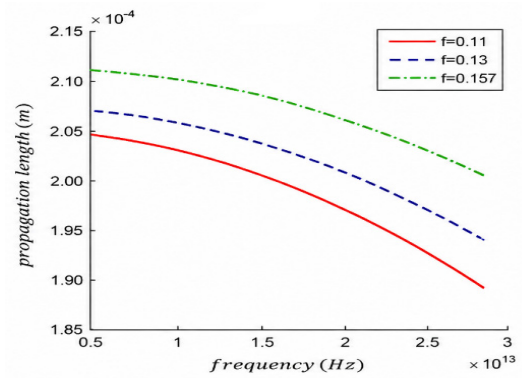


(الف)

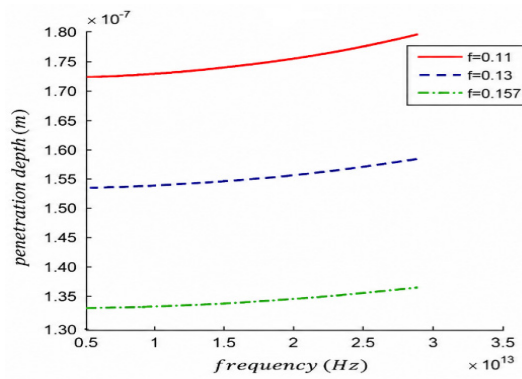


(ب)

شکل ۱۲: طول انتشار (الف) و عمق نفوذ (ب) بر حسب پتانسیل شیمیایی گرافین با تغییر مقدار پراشگری برای فرکانس ۳۰ تراهرتز.



(الف)



(ب)

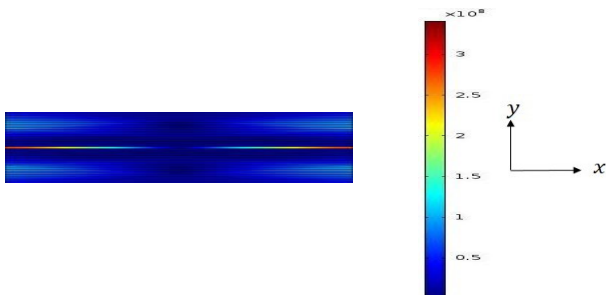
شکل ۱۱: طول انتشار (الف) و عمق نفوذ (ب) بر حسب فرکانس با تغییر مقدار پراشگری برای هسته از جنس هوا.

۱ eV در فرکانس ۳۰ تراهرتز تغییر می‌دهیم و تغییرات طول انتشار و محصورشدگی را خواهیم دید.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافین از ۰/۴ eV تا ۱ eV طول انتشار موج پلاسما کاهش می‌یابد؛ یعنی حدوداً نصف می‌شود؛ اما محصورشدگی موج پلاسما تقریباً دوبرابر بهبود می‌یابد. پس تغییر پتانسیل شیمیایی گرافین باعث تنظیم‌پذیری می‌شود. همان‌طور که ذکر شد این نمودارها برای ضخامت هسته ۱۰ نانومتر رسم شده است و در شکل ۱۰ دیدیم که برای ضخامت کم هسته مشکل کم‌بودن محصورشدگی به وجود آمد؛ اما با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافین می‌توان محصورشدگی را برای ابعاد کوچک هسته نیز بهبود داد. البته تغییرات طول انتشار و محصورشدگی با تغییر پتانسیل شیمیایی به ابعاد فیزیکی ساختار بستگی دارد، مثلاً وقتی ضخامت و جنس هسته را تغییر دهیم ممکن است طول انتشار با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافین بیشتر شود.

از تغییر پارامترهای ساختار موجبر می‌توان نتیجه گرفت که برای طراحی موجبر بهتر است از دی‌الکتریک سیلیکون و گرافین سه‌لایه در پوشش موجبر استفاده کنیم. همچنین استفاده از هسته MgF_2 ترجیح داده می‌شود. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ پروفایل میدان را برای ضخامت هسته ۱۰ نانومتر و ۵۰ نانومتر مشاهده می‌کنیم. در اینجا هسته را از MgF_2 با ضریب گذردی الکتریکی $1/88$ انتخاب کردیم و گرافین سه‌لایه با ضخامت $1/5$ نانومتر با پتانسیل شیمیایی $\mu = 0.5 \text{ eV}$ و دی‌الکتریک پوشش سیلیکون مورد استفاده قرار گرفته است.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنیم میدان موج پلاسما که در مرز مشترک هسته و پوشش تولید شده با دور شدن از هسته و نفوذ در پوشش کاهش می‌یابد و در هسته ۱۰ نانومتری که هادی موج پلاسما محسوب می‌شود متمرکز شده است. با توجه به نمودارهای طول انتشار و



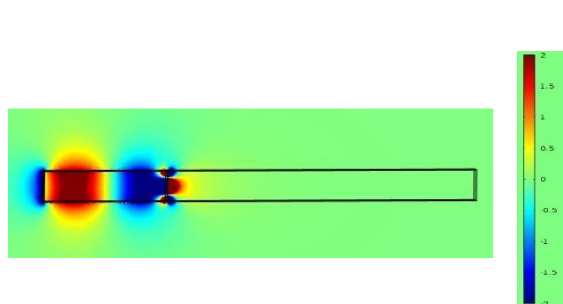
شکل ۱۳: پروفایل میدان در صفحه x-y و نمودار توزیع میدان در راستای y.

محصورشده می‌توان طول انتشار موجبر تقریباً به ۱ میلی‌متر و محصورشدگی آن را به ۱۵۰ نانومتر رساند.

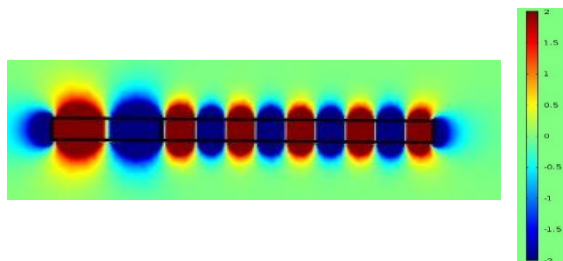
۴-۳ طراحی سوئیچ الکترو نوری

در این قسمت یک سوئیچ الکترو نوری بر پایه موجبر گرافین فوتونیک کریستال طراحی می‌کنیم. همان‌طور که دیدیم طول انتشار موجبر با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافین قابل تنظیم بود. در اینجا از این خاصیت گرافین استفاده می‌کنیم، به این صورت که در یک فرکانس خاص برای مقادیری از پتانسیل شیمیایی گرافین طول انتشار بالا و برای مقادیری از پتانسیل شیمیایی گرافین طول انتشار نخواهیم داشت.

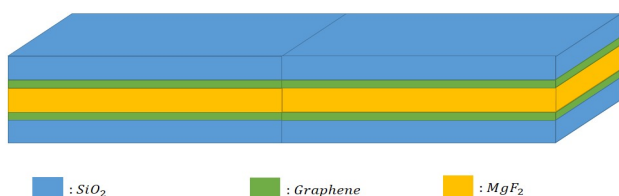
در شکل ۱۵ ساختار سوئیچ الکترو نوری بر پایه موجبر پلاسما را مشاهده می‌کنیم. عملکرد این سوئیچ در فرکانس ۳۰ تراهرتز بررسی می‌شود. برای طراحی سوئیچ از گرافین تک‌لایه و دی‌الکتریک دی‌اکسید سیلیکون به ضخامت ۱۰ نانومتر در پوشش موجبر استفاده شده است و هسته را از جنس MgF_2 با ضخامت ۱۰ نانومتر است. عرض موجبر ۲۵ نانومتر و طول موجبر ۲۵۰ نانومتر است. در اینجا پوشش به صورت متناوب نیست و فقط از یک‌لایه گرافین و یک‌لایه دی‌اکسید سیلیکون تشکیل



شکل ۱۶: حالت خاموش سوئیچ الکترو نوری.



شکل ۱۷: حالت روشن سوئیچ الکترو نوری.



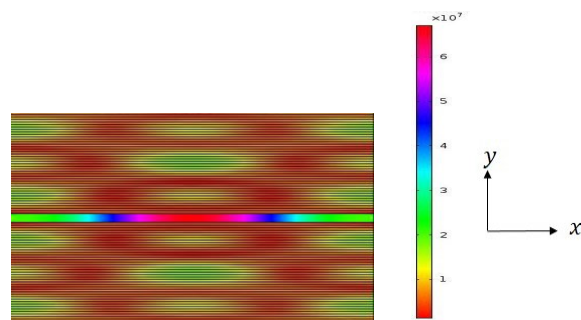
شکل ۱۸: گیت منطقی AND بر پایه موجبر پلاسمونی.

۱۰ نانومتر در پوشش موجبر استفاده شده است و هسته را از جنس MgF_2 با ضخامت ۱۰ نانومتر است و عرض گیت ۲۵ نانومتر است. همان‌طور که از شکل پیداست دو موجبر با مشخصات ذکر شده در کنار هم قرار داده شده‌اند و طول قسمت سمت چپ و سمت راست گیت AND هر کدام ۲۵۰ نانومتر است. موج پلاسمون توسط یک آنتن دوقطبی که ابتدای گیت قرار دارد بر روی گرافین معلق به طول ۱۰۰ نانومتر و عرض ۲۵ نانومتر تحریک می‌شود. گیت AND هم در فرکانس ۳۰ تراهرتز بررسی شده است. در جدول ۱ رفتار گیت به‌ازای پتانسیل شیمیایی گرافین آورده شده است. نتایج شبیه‌سازی گیت AND در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود.

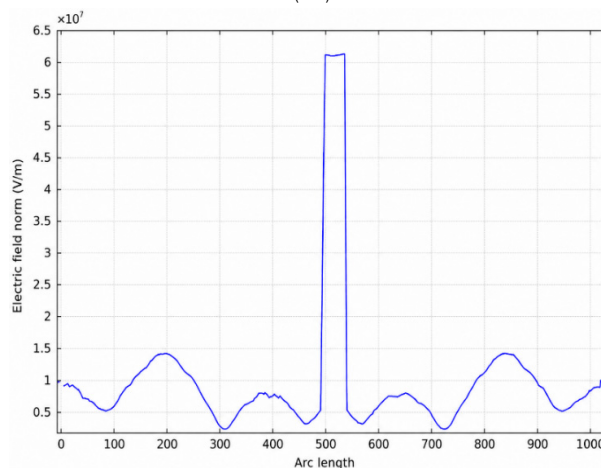
در شکل ۱۹ حالات مختلف برای گیت AND مشاهده می‌شود. برای حالت ۰۰ و ۰۱ و ۱۰ تقریباً موجی به انتهای گیت نرسیده است. برای حالت ۱۱ تقریباً ۶۳ درصد موج پلاسمون ورودی به انتهای گیت رسیده است.

در گیت‌های منطقی پلاسمونیک مبتنی بر گرافین پیشنهادی (با فرکانس کاری ۳۰ THz)، تحریک مد پلاسمونی در ورودی با استفاده از یک آنتن دوقطبی واقع بر روی بخش گرافین معلق (با ابعاد $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$) برای گیت AND و $50 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ برای گیت OR انجام می‌شود. حالات منطقی ورودی از طریق تنظیم الکترواستاتیکی پتانسیل شیمیایی گرافین (μ_c) در بازوهای چپ و راست (یا بالا و پایین) به شرح زیر مدل‌سازی شده‌اند:

در گیت منطقی AND سطح منطقی «۰» معادل پتانسیل شیمیایی $\mu_c = 0.165 \text{ eV}$ و سطح منطقی «۱» معادل $\mu_c = 0.115 \text{ eV}$ تعریف شده است. حالت‌های ۰۰، ۰۱ و ۱۰ به دلیل افت بالا و عدم تطابق انتشار در پتانسیل‌های پایین، موج پلاسمون در طول مسیر مستهلک شده و

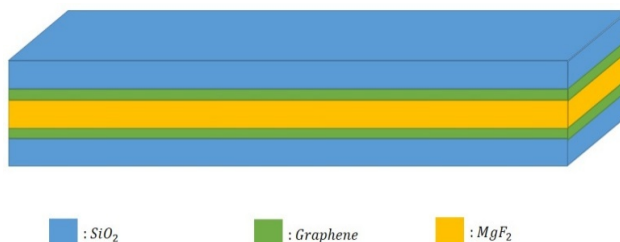


(الف)



(ب)

شکل ۱۴: (الف) پروفایل میدان در صفحه x-y و (ب) نمودار توزیع میدان در راستای y.



شکل ۱۵: سوئیچ الکترو نوری بر پایه موجبر پلاسمونی.

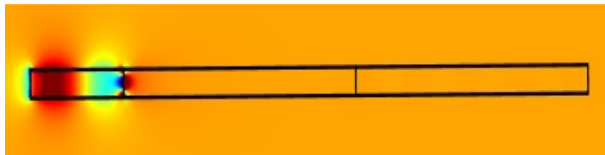
شده است. در این حالت نیز ضریب گذردهی الکتریکی پوشش همان ضریب گذردهی حالت متناوب است که از تئوری محیط مؤثر محاسبه می‌شود. موج پلاسمون توسط یک آنتن دوقطبی که ابتدای موجبر قرار دارد بر روی گرافین معلق به طول ۱۰۰ نانومتر و عرض ۲۵ نانومتر تحریک می‌شود.

برای حالت خاموش سوئیچ پتانسیل شیمیایی گرافین را 0.165 eV و برای حالت روشن پتانسیل شیمیایی گرافین را 0.115 eV در نظر می‌گیریم. همان‌طور که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود برای حالت خاموش تقریباً موجی به انتهای موجبر نرسیده است و برای حالت روشن ۷۳ درصد موج پلاسمون انتهای موجبر رسیده است. پس با تغییر پتانسیل شیمیایی که با اعمال ولتاژ امکان‌پذیر است، می‌توانیم سوئیچ پلاسمونی که در دو حالت خاموش و روشن داشته باشیم.

۴-۴ طراحی گیت منطقی AND

در این قسمت باتوجه‌به مطالب گفته شده در بخش قبل یک گیت منطقی AND را به‌صورت زیر طراحی می‌کنیم.

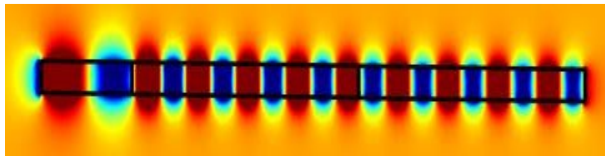
ساختار گیت AND را در شکل ۱۸ مشاهده می‌کنیم. برای طراحی سوئیچ از گرافین تک‌لایه و دی‌الکتریک دی‌اکسید سیلیکون به ضخامت



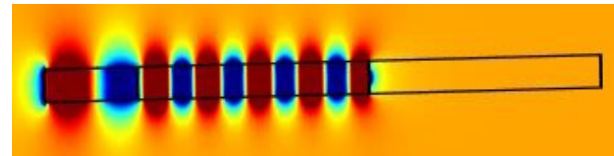
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

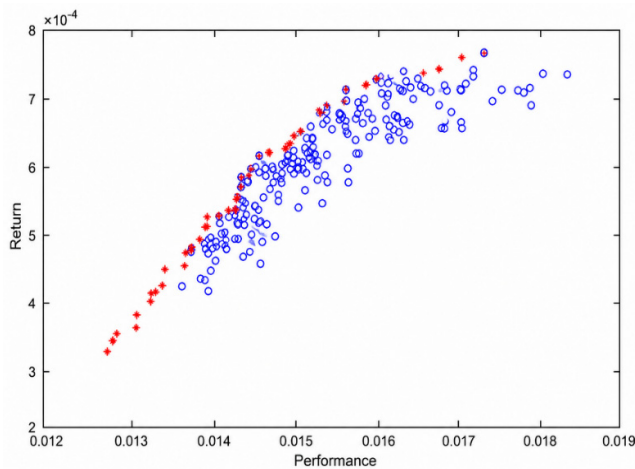
شکل ۱۹: حالات کاری گیت منطقی AND، (الف) حالت ۰۰، (ب) حالت ۰۱، (ج) حالت ۱۰ و (د) حالت ۱۱.

جدول ۱: پتانسیل شیمیایی گرافین پوشش برای حالت خاموش و روشن گیت AND (معادل انرژی فرمی E_F).

	حالت خاموش		حالت روشن	
	۰۰	۰۱	۱۰	۱۱
پتانسیل شیمیایی گرافین موجبر سمت چپ	۰/۰۶۵ eV	۰/۰۶۵ eV	۰/۱۵ eV	۰/۱۵ eV
پتانسیل شیمیایی گرافین موجبر سمت راست	۰/۰۶۵ eV	۰/۱۵ eV	۰/۰۶۵ eV	۰/۱۵ eV

جدول ۲: خطاها و دقت پیش‌بینی مدل‌های بهینه‌سازی گیت‌های منطقی AND بر پایه موجبر پلاسمونی بر پایه شبکه عصبی LSTM.

	RMSE	MAPE	R ²
بدون LSTM	۸۳۸/۸۶	۸/۹۳	۰/۵۴
با LSTM	۶۵۲/۶۶	۸/۱۲	۰/۷۹



شکل ۲۰: بهینه‌سازی گیت‌های منطقی AND بر پایه موجبر پلاسمونی با برازش LSTM (قرمز رنگ) و بدون LSTM (آبی رنگ)

پلاسمونی با LSTM و بدون LSTM نشان می‌دهد.

۴-۵ طراحی گیت منطقی OR

در اینجا با استفاده از موجبر پیشنهادی یک گیت منطقی OR را به صورت زیر طراحی می‌کنیم.

ساختار گیت OR را در شکل ۲۱ مشاهده می‌کنیم. برای طراحی سوئیچ از گرافین تک‌لایه و دی‌الکترونیک دی‌اکسید سیلیکون به ضخامت ۱۰ نانومتر در پوشش موجبر استفاده شده است و هسته را از جنس MgF_2 با ضخامت ۱۰ نانومتر است. موج پلاسمون توسط یک آنتن دوقطبی که ابتدای گیت قرار دارد بر روی گرافین معلق به طول ۱۰۰ نانومتر و عرض ۵۰ نانومتر تحریک می‌شود. گیت OR هم در فرکانس

تقریباً هیچ توانی به خروجی گیت نمی‌رسد (خروجی صفر منطقی). حالت ۱۱: با تنظیم پتانسیل شیمیایی هر دو بازو بر روی $\mu_c = 0.15$ eV مد پلاسمونی هدایت شده و حدود ۶۳ درصد از موج پلاسمون ورودی به انتهای گیت (پورت خروجی) می‌رسد (خروجی یک منطقی).

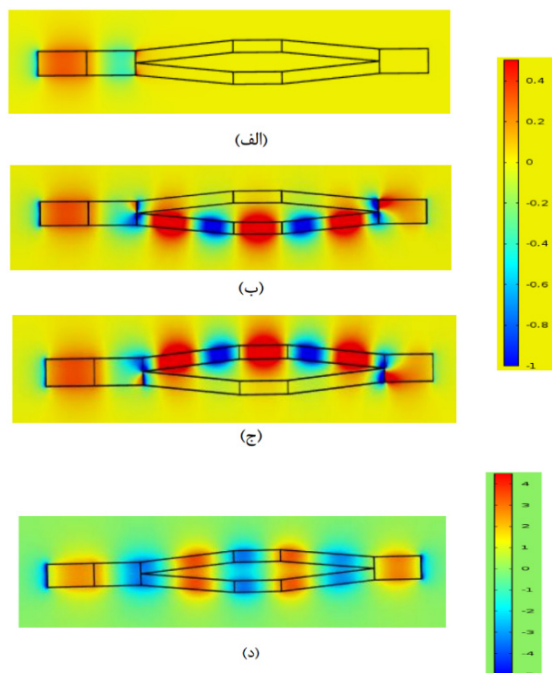
در گیت منطقی OR حالات منطقی با پتانسیل‌های شیمیایی $\mu_c = 0.065$ eV برای «۰» و $\mu_c = 0.35$ eV برای «۱» اعمال می‌شوند.

در حالت‌های تک‌ورودی یا دوورودی روشن (حالات ۰۱، ۱۰ و ۱۱)، پتانسیل ۰/۳۵ eV شرایط عبور موج به انتهای خروجی را فراهم کرده و تنها در حالت ۰۰ خروجی خاموش است.

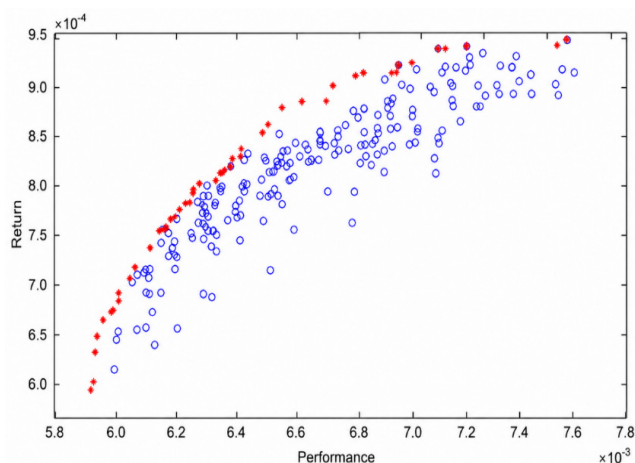
توان خروجی در صفحه انتهایی موجبر از طریق انتگرال‌گیری شار بردار پوینتینگ محاسبه و به عنوان معیار سطح منطقی خروجی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲ دقت پیش‌بینی و خطاهای شبکه‌های عصبی LSTM جهت بهینه‌سازی گیت منطقی AND بر پایه موجبر پلاسمونی را ارائه می‌کند. لازم به یادآوری است که این شبکه‌ها با توجه به معماری منحصر به فردشان، علاوه بر داده‌های یک و دو بعدی، قادر به دریافت داده‌های سه بعدی به عنوان ورودی می‌باشند. جدول ۲ نشان می‌دهد که میانگین درصد خطای مطلق بهینه‌سازی گیت منطقی AND بر پایه موجبر پلاسمونی زمانی که از الگوریتم LSTM استفاده می‌شود، بالاتر از زمانی است که شبکه از LSTM استفاده نمی‌کند. همچنین عدد ضریب تعیین مدل با LSTM بالاتر از مدل بدون LSTM است که بیانگر ارائه منحنی برازش بهتر توسط مدل با LSTM می‌باشد.

شکل ۲۰ برازش بهینه‌سازی گیت‌های منطقی AND را بر پایه موجبر



شکل ۲۲: حالات کاری گیت منطقی OR، (الف) حالت ۰۰، (ب) حالت ۰۱، (ج) حالت ۱۰، و (د) حالت، (نوار رنگی پتانسیل شیمیایی است که بر حسب eV مقیاس‌بندی شده است).



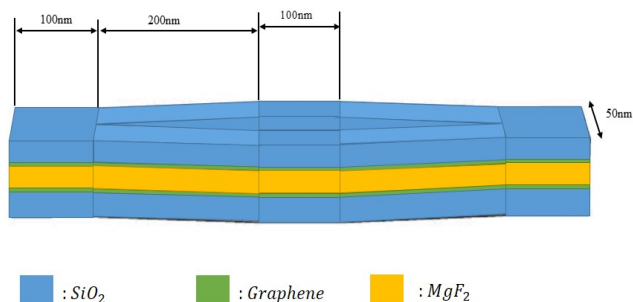
شکل ۲۳: حالات کاری گیت منطقی OR، (الف) حالت ۰۰، (ب) حالت ۰۱، (ج) حالت ۱۰، و (د) حالت، (نوار رنگی پتانسیل شیمیایی است که بر حسب eV مقیاس‌بندی شده است).

جدول ۳: پتانسیل شیمیایی گرافین پوشش برای حالت خاموش و روشن گیت OR.

	حالت خاموش		حالت روشن	
	۰۰	۰۱	۱۰	۱۱
پتانسیل شیمیایی	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV
گرافین بازوی بالایی	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV
پتانسیل شیمیایی	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV
گرافین بازوی پایینی	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV	۰/۰۶۵ eV	۰/۳۵ eV

جدول ۴: خطاها و دقت پیش‌بینی مدل‌های بهینه‌سازی گیت‌های منطقی OR بر پایه موجبر پلاسمونی بر پایه شبکه عصبی LSTM.

	RMSE	MAPE	R ²
LSTM بدون	۱۵۱۰/۳۶	۱۱/۵۳	۰/۵۱
LSTM با	۱۲۳۱/۷۳	۱۱/۱۵	۰/۷۴



شکل ۲۱: گیت منطقی OR بر پایه موجبر پلاسمونی.

۳۰ تراهرتز بررسی شده است و با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافین موجود در بازوهای ساختار، ۰/۳۵ eV برای یک منطقی و ۰/۰۶۵ eV برای صفر منطقی، می‌توان رفتار گیت منطقی OR را مشاهده کرد. نتایج شبیه‌سازی گیت OR در شکل‌های زیر مشاهده می‌شود.

در شکل ۲۲ حالات مختلف برای گیت OR مشاهده می‌شود. برای حالت ۰۰ تقریباً موجی به انتهای گیت نرسیده است. برای حالت ۰۱ تقریباً ۳۰ درصد و حالت ۱۰ تقریباً ۳۰ درصد و حالت ۱۱ تقریباً ۸۳ درصد موج پلاسمون ورودی به انتهای گیت رسیده است. در جدول ۳ رفتار گیت OR به ازای پتانسیل شیمیایی گرافین آورده شده است.

جدول ۴ دقت پیش‌بینی و خطاهای شبکه‌های عصبی LSTM جهت بهینه‌سازی گیت منطقی OR بر پایه موجبر پلاسمونی را ارائه می‌کند. لازم به یادآوری است که این شبکه‌ها با توجه به معماری منحصر به فردشان، علاوه بر داده‌های یک و دو بعدی، قادر به دریافت داده‌های سه بعدی به عنوان ورودی می‌باشند. جدول ۴ نشان می‌دهد که میانگین درصد خطای مطلق بهینه‌سازی گیت منطقی OR بر پایه موجبر پلاسمونی زمانی که از الگوریتم LSTM استفاده می‌شود، بالاتر از زمانی است که شبکه از LSTM استفاده نمی‌کند. همچنین عدد ضریب تعیین مدل با LSTM بالاتر از مدل بدون LSTM است که بیانگر ارائه منحنی برآزش بهتر توسط مدل با LSTM می‌باشد.

شکل ۲۳ برازش بهینه‌سازی گیت‌های منطقی OR بر پایه موجبر پلاسمونی با LSTM و بدون LSTM نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف طراحی یک سوئیچ تمام نوری پلاسمونی مبتنی بر تشدیدکننده‌های پلاسمونیک با دخیل کردن خاصیت کر، انجام شده است. بعد از رسیدن به یک سوئیچ تمام نوری پلاسمونی با طول موج تشدید در ۱۵۲۰ نانومتر، از سوئیچ می‌توان به‌عنوان گیت NOT بهره برد. از ترکیب دو ساختار سوئیچ به‌صورت موازی و تحت شرایط خاص می‌توان به عملکرد دو گیت AND و NOR رسید. تمامی شبیه‌سازی‌های این مقاله و مقاله اصلی با نرم‌افزار مولتی فیزیک - کامسول، ماژول Wave optics، با بهره‌گیری از روش المان محدود (FEM) انجام شده‌اند. برخلاف گیت‌های NOT و NOR که نمودار انتقال آن‌ها در مقاله پایه ارائه شده، راندمان انتقال ۹۰٪ گیت AND در مرجع مذکور بدون ارائه شبیه‌سازی و منحنی‌های خروجی گزارش شده بود. در این مقاله درصد انتقال برای گیت AND، حدود ۵۲ درصد است که در مقایسه با درصد انتقال دو گیت دیگر کم می‌باشد. اما درصد انتقال دو گیت NOT و NOR در مقایسه با اصل مقاله بسیار بهتر می‌باشند.

به‌عنوان کارهای آینده، بررسی مواد غیرخطی جایگزین با ضریب کر بالاتر، تغییر طول حلقه و هندسه‌های مختلف آن، کاهش توان مصرفی

- [20] W. Su and Z. Geng, "Terahertz all-optical logic gates based on a graphene nanoribbon rectangular ring resonator," *IEEE Photonics Journal*, vol. 10, no. 6, 8 pp., Dec. 2018.
- [21] Y. Dan, Z. Fan, X. Sun, T. Zhang, and K. Xu, "All-type optical logic gates using plasmonic coding metamaterials and multi-objective optimization," *Optics Express*, vol. 30, no. 7, pp. 11633-11646, 2022.
- [22] T. Zhang, *et al.*, "Machine learning and evolutionary algorithm studies of graphene metamaterials for optimized plasmon-induced transparency," *Optics Express*, vol. 28, no. 13, pp. 18899-18916, 2020.
- [23] A. Akhavan, S. Abdolhosseini, H. Ghafoorifard, and H. Habibiyan, "Narrow band total absorber at near-infrared wavelengths using monolayer graphene and sub-wavelength grating based on critical coupling," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 23, pp. 5593-5599, 1 Dec. 2018.
- [24] T. Li, K. Chen, X. Luo, J. Zhao, and Y. Feng, "Graphene-based Terahertz metasurface Salisbury screen with tunable wideband absorption," in *Proc. 2019 Int. Applied Computational Electromagnetics Society Symp.-China*, 2 pp., Nanjing, China, 8-11 Aug. 2019.
- [25] T. Aghaee and A. A. Orouji, "Reconfigurable multi-band, graphene-based THz absorber: circuit model approach," *Results in Physics*, vol. 16, Article ID: 102855, Mar. 2020.
- [26] Y. Qi, *et al.*, "A tunable terahertz metamaterial absorber composed of hourglass-shaped graphene arrays," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 3, Article ID: 533, 2020.
- [27] S. Ogawa, M. Shimatani, S. Fukushima, S. Okuda, and K. Matsumoto, "Graphene on metal-insulator-metal-based plasmonic metamaterials at infrared wavelengths," *Optics Express*, vol. 26, no. 5, pp. 5665-5674, 2018.

علی نامدار تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی مهندسی برق- الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۹۶ و ۱۴۰۵ در دانشکده شهید باهنر شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان و دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز به پایان رسانده است. نام‌برده از سال ۱۴۰۰ تاکنون سابقه تدریس دروس تخصصی در گروه‌های مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه ملی و مهارت-دانشکده شهید باهنر شیراز و دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز را در کارنامه خود دارد. زمینه‌های اصلی پژوهشی ایشان متمرکز بر نانویولاسمونیک، مدارهای مجتمع نوری، بایوالکترونیک و به طور ویژه توسعه مدل‌های جانشین مبتنی بر شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های هوشمند می‌باشد.

مریم محیط‌پور در سال ۱۳۷۸ مدرک کارشناسی فیزیک خود را از دانشگاه تهران و در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی انرژی خود را از آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۸۶ دوره دکتری مهندسی انرژی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران را آغاز کرد و در سال ۱۳۹۳ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی انرژی از دانشگاه مذکور گردید. ایشان از سال ۱۳۸۹ به عنوان عضو هیأت علمی گروه مهندسی برق در دانشگاه آزاد اسلامی شیراز مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل تمام گرایش‌های مهندسی برق مرتبط با انرژی از جمله کاربردهای پلاسمونیک و نانو فوتونیک در حوزه انرژی همچنین کنترل پیشرفته در سامانه‌های انرژی می‌باشد.

گوهر ورامینی متولد مهر ماه ۱۳۶۲ در شیراز تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی برق و مخابرات به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۶ در دانشگاه‌های آزاد اسلامی واحد جهرم، بوشهر و علوم و تحقیقات تهران به پایان رسانده است. ایشان از سال ۱۳۸۸ به عنوان مربی و از سال ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۲ به عنوان استادیار و از سال ۱۴۰۲ به عنوان دانشیار در دانشگاه آزاد اسلامی حضور داشته است. نام‌برده همزمان با فعالیت آکادمیک طرح‌های برون دانشگاهی و همکاری مستمر در زمینه‌های مخابرات سیستم، میدان و امواج، رادار، سونار، شناورهای سطحی، آنتن‌های مایکرو استریپ و یادگیری عمیق و ... با مراکز مختلف صنعتی و تحقیقاتی داشته است.

ورودی، بهبود تابع برازندگی به منظور کاهش حجم سخت‌افزار، و به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر پیشنهاد می‌شود. همچنین بهینه‌سازی ضرایب جریمه و استفاده از روش پیشنهادی در سایر کدهای ماتریسی می‌تواند به تعمیم‌پذیری بیشتر نتایج کمک نماید.

مراجع

- [1] H. Meng, *et al.*, "Tunable graphene-based plasmonic multispectral and narrowband perfect metamaterial absorbers at the mid-infrared region," *Applied Optics*, vol. 56, no. 21, pp. 6022-6027, 20 Jul. 2017.
- [2] Z. Yi, *et al.*, "Tunable graphene-based plasmonic perfect metamaterial absorber in the THz region," *Micromachines*, vol. 10, no. 3, Article ID: 194, 2019.
- [3] C. Guo, *et al.*, "Graphene-based perfect absorption structures in the visible to terahertz band and their optoelectronics applications," *Nanomaterials*, vol. 8, no. 12, Article ID: 1033, 2018.
- [4] T. Sang, *et al.*, "Angle-insensitive broadband absorption enhancement of graphene using a multi-grooved metasurface," *Nanoscale Research Letters*, vol. 14, Article ID: 105, 2019.
- [5] Z. Bao, *et al.*, "Inversion method characterization of graphene-based coordination absorbers incorporating periodically patterned metal ring metasurfaces," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, Article ID: 1102, 2020.
- [6] H. Vahed and S. Soltan Ahmadi, "Graphene-based plasmonic electro-optic modulator with sub-wavelength thickness and improved modulation depth," *Applied Physics B*, vol. 123, Article ID: 165, 2017.
- [7] F. Gao, *et al.*, "Broadband wave absorption in single-layered and nonstructured graphene based on far-field interaction effect," *Optics Express*, vol. 25, no. 9, pp. 9579-9586, 2017.
- [8] H. Li, *et al.*, "Investigation of multiband plasmonic metamaterial perfect absorbers based on graphene ribbons by the phase-coupled method," *Carbon*, vol. 141, pp. 481-487, Jan. 2019.
- [9] S. Ogawa and M. Kimata, "Metal-insulator-metal-based plasmonic metamaterial absorbers at visible and infrared wavelengths: A review," *Materials*, vol. 11, no. 3, Article ID: 458, 2018.
- [10] B. Liu, *et al.*, "Multiband and broadband absorption enhancement of monolayer graphene at optical frequencies from multiple magnetic dipole resonances in metamaterials," *Nanoscale Research Letters*, vol. 13, Article ID: 158, 2018.
- [11] Y. Li, *et al.*, "Dual dynamically tunable plasmon-induced transparency and absorption in I-type-graphene-based slow-light metamaterial with rectangular defect," *Optik*, vol. 246, Article ID: 167837, Nov. 2021.
- [12] S. K. Ghosh, S. Das, and S. Bhattacharyya, "Graphene based metasurface with near unity broadband absorption in the terahertz gap," *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, vol. 30, no. 12, Article ID: e22436, 2020.
- [13] M. M. Ghods and M. Afsahi, "Quad-band tunable graphene-based metamaterial absorber operating at THz frequencies," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, Article ID: 594, 2021.
- [14] J. Parmar and S. K. Patel, "Tunable and highly sensitive graphene-based biosensor with circle/split ring resonator metasurface for sensing hemoglobin/urine biomolecules," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 624, Article ID: 413399, Jan. 2022.
- [15] Z. Madadi, "Graphene-based tunable plasmonic perfect absorber in FIR-band range," *Plasmonics*, vol. 13, Article ID: 102149, Jun. 2021.
- [16] H. Lin, *et al.*, "A 90-nm-thick graphene metamaterial for strong and extremely broadband absorption of unpolarized light," *Nature Photonics*, vol. 13, pp. 270-276, 2019.
- [17] X. Jin, *et al.*, "Coherent perfect absorber with independently tunable frequency based on multilayer graphene," *Optics Communications*, vol. 446, 44-50, Sept. 2019.
- [18] X. Luo *et al.*, "A tunable dual-band and polarization-insensitive coherent perfect absorber based on double-layers graphene hybrid waveguide," *Nanoscale Research Letters*, vol. 14, Article ID: 337, 2019.
- [19] J. Wu, "Multichannel absorption enhancement in graphene based on metal-photonic crystal hetero-structure," *ES Energy & Environment*, vol. 13, pp. 25-30, 2021.