

ORIGINAL ARTICLE

Design and Simulation of Compact Subwavelength Electro-Optic Switch Based on Graphene Surface Plasmon Polaritons

Mohammad Javad Maleki¹, Mohammad Soroosh^{2*}, Gholamreza Akbarizadeh³

1 Ph.D. Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2 Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3 Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Correspondence

Mohammad Soroosh

Email: m.soroosh@scu.ac.ir

How to cite

Maleki, M.J. Soroosh, M. Akbarizadeh, Gh. (2023). Design and Simulation of Compact Subwavelength Electro-Optic Switch Based on Graphene Surface Plasmon Polaritons, *Optoelectronic*, 6(1), 41-50.

ABSTRACT

In this study, a small electro-optic switch is designed and simulated by designing a plasmonic waveguide with high confinement. By using a silicon ridge near graphene and adjusting its chemical potential, a plasmonic channel is provided that controls the optical signals transmission depending on the graphene chemical potential. By applying chemical potentials of 0.1 eV and 0.5 eV, the channel loss for frequencies ranging from 25 to 45 THz changes from 78.03 to 0.23 dB/ μm . The structure size is 0.057 μm^2 , which is smaller than similar structures. The small size of the structure is one of the fundamental requirements of optical integrated circuit designing. This feature, along with a coupling length of 218.2 μm and a figure of merit of 1246, indicates that surface plasmons are well confined and guided in the designed channel. With regard to the obtained results, the designed plasmonic switch can be proposed for various analog and digital applications.

KEYWORDS

Surface Plasmon Polaritons, Plasmonic Channel, Electro-Optic Switch, Graphene.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

طراحی و شبیه‌سازی کلید الکترواپتیکی زیر طول موج فشرده مبتنی بر پلاسمون پلاریتون‌های سطحی گرافن

محمد جواد ملکی¹، محمد سروش^{2*}، غلامرضا اکبری زاده³

چکیده

در این پژوهش، با طراحی یک موج بر پلاسمونی با محصورشدگی قوی، یک کلید کوچک الکترواپتیکی طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از یک برجستگی سیلیکونی در نزدیکی گرافن و تنظیم پتانسیل شیمیایی آن، یک کانال پلاسمونی ایجاد می‌شود که بسته به مقدار پتانسیل شیمیایی گرافن، گذر سیگنال نوری را کنترل می‌کند. با اعمال پتانسیل شیمیایی 0/1 و 0/5 الکترون‌ولت، تلفات کانال به ازای بسامدهای 25 تا 45 تراهرتز از 78/03 تا 0/23 دسی‌بل بر میکرومتر تغییر می‌کند. اندازه ساختار برابر 0/057 میکرومتر مربع است که نسبت به ساختارهای مشابه کوچک‌تر است. اندازه کوچک ساختار یکی از نیازهای اساسی در طراحی مدار مجتمع نوری است. این ویژگی همراه با طول تزویج 218/2 میکرومتر و ضریب شایستگی 1246 نشان می‌دهد که پلاسمون‌های سطحی به خوبی در کانال طراحی شده محصور و هدایت می‌شوند. با توجه به نتایج به دست آمده، کلید پلاسمونی طراحی شده را برای کاربردهای آنالوگ و دیجیتال مختلف می‌توان پیشنهاد داد.

واژه‌های کلیدی

پلاسمون پلاریتون سطحی، کانال پلاسمونی، کلید الکترواپتیکی، گرافن.

1 دانشجوی دکترا، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
2 استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
3 استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

نویسنده مسئول:

محمد سروش

رایانامه: m.soroosh@scu.ac.ir

استناد به این مقاله:

محمد جواد ملکی، محمد سروش، غلامرضا اکبری زاده (1402). طراحی و شبیه‌سازی کلید الکترواپتیکی زیر طول موج فشرده مبتنی بر پلاسمون پلاریتون‌های سطحی گرافن. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(1)، 41-50.

مقدمه

عنوان یک لایه نازک موثر در طراحی ساختارها مطرح کرده‌اند. نشان داده شده است که تلفات انتشار پلاسمون‌های سطحی در سطح مشترک گرافن-نیم‌رسانا کم‌تر از فلز-نیم‌رسانا است بنابراین طول انتشار گرافن نسبت به فلزهایی مانند طلا، نقره و نیکل بیشتر است. تاکنون از افزاره‌های مبتنی بر پلاسمون، پلاریتون‌های سطحی مختلفی از جمله رمزگذارها [15]، رمزگشاها [16]، حسگرها [17] و مالتی پلکسرها [18] طراحی شده‌اند که در این ساختارها از کلیدهای پلاسمونی مبتنی بر گرافن به عنوان ساختار پایه استفاده شده است. کلیدها یکی از ساختارهای کاربردی در طراحی افزاره‌های نوری هستند که سیگنال‌های نوری را به‌طور انتخابی از یک کانال به کانال دیگر منتقل می‌کنند. از این افزاره‌ها در کاربردهای متنوع دیجیتال و آنالوگ می‌توان بهره برد.

کریمی و همکاران [19]، در پژوهشی دو کلید پلاسمونی تمام نوری بر اساس موج‌بر فلز-عایق-فلز پیشنهاد کرده‌اند. در این ساختارها از ماده غیرخطی و تشدید امواج برای دستیابی به کلیدزنی تمام نوری استفاده شده است. آن‌ها نشان داده‌اند که افزودن دو موج‌بر متعام کوچک به یک موج‌بر، می‌تواند باعث ایجاد یک تشدید شود که ایده اولیه طراحی کلید است. در ادامه، نشان داده شده است که با اضافه کردن یک تشدیدکننده متقاطع شکل بین موج‌برهای کوچک گفته شده می‌توان برخی ویژگی‌های کلید را بهبود بخشید. اندازه ساختار $0/263$ میکرومتر مربع گزارش شده است. چائوهان⁵ و همکاران [20] با استفاده از ساختار فابری پرو⁶، یک کلید مبتنی بر موج‌بر پلاسمونی و از جنس دی‌اکسید وانادیم پیشنهاد داده‌اند. مقادیر گزارش شده برای تلفات الحاقی⁷ $1/43$ دسی‌بل، ضریب کیفیت 146 و ضریب شایستگی 33/31 است. امامی نژاد و همکاران [21] یک کلید نوری مبتنی بر سیلیکون در بازه بسامدی 20 تا 50 تراهرتز ارائه کردند. کلید پیشنهادی شامل یک موج‌بر سیلیسی است که بین لایه‌های Al_2O_3 محصور شده است و پلاسمون پلاریتون‌های سطحی را هدایت می‌کند. در این پژوهش، با استفاده از اضافه کردن ناخالصی و اعمال ولتاژ، پتانسیل شیمیایی سیلیسن تغییر کرده و تلفات عبور پلاسمون نیز تغییر می‌کند. از این موضوع برای طراحی حالت‌های ON و OFF استفاده شده است. ضریب کیفیت، تلفات الحاقی و نسبت خاموشی برای کلید پیشنهادی به ترتیب 189، $0/39$ دسی‌بل و 51 دسی‌بل گزارش شده است. خانی و همکاران [22]، یک

انتقال اطلاعات توسط نور یکی از زمینه‌های جذاب برای پژوهشگران است که سرعت زیاد جابه‌جایی داده و پردازش سریع اطلاعات را در پی دارد. گزینه‌های مختلفی مانند بلورهای فوتونی [1-5]، بازوهای ماخ زندر¹ [6,7] و پلاسمون‌های سطحی [8,9] برای طراحی افزاره‌های نوری پیشنهاد شده‌اند. ساختارهای مبتنی بر بلورهای فوتونی بر اساس ویژگی‌هایی مانند گاف فوتونی، نور کند² و خودتوازی³ طراحی می‌شوند [10]. اگرچه این ساختارها، کارکرد قابل قبولی دارند اما ابعاد بزرگ آن‌ها به چند ده میکرومتر مربع می‌رسد و برای مدارهای مجتمع نوری مناسب نیستند. اصل مقیاس‌پذیری نشان می‌دهد که می‌توان با کوچک شدن ابعاد و رعایت برخی نسبت‌ها، ویژگی‌های نامطلوب را حذف کرد. بنابراین خوش‌بینانه است که با پیشرفت فناوری بتوان از ساختارهای مبتنی بر بلورهای فوتونی در مدارهای مجتمع استفاده کرد. ساختارهای مبتنی بر بازوهای ماخ زندر عموماً طول زیادی دارند و برای اندرکنش نور و ماده لازم است تا طول هر بازو چند میکرومتر باشد. در نتیجه، این ساختارها نیز برای طراحی در ابعاد نانومتری مناسب نیستند. نشان داده شده است که ساختارهای پلاسمونی می‌توانند با غلبه بر پراش نور در ابعاد کوچک، پلاسمون‌های سطحی را در سطح مشترک فلز-نیم‌رسانا هدایت کنند [11].

پلاسمون‌های سطحی به صورت نوسان الکترون‌های باند ظرفیت ناشی از اعمال میدان مغناطیسی تعریف می‌شوند. در صورتی که نوسان الکترون‌های باند ظرفیت ناشی از اعمال نور باشد، به این نوسان‌ها پلاسمون پلاریتون‌های سطحی⁴ (SPPs) گفته می‌شود [12,13]. از مزیت‌های استفاده از پلاسمون‌های سطحی در طراحی افزاره‌های نوری، می‌توان به اندازه کوچک، محصورشدگی قوی نور، امکان کنترل و هدایت پلاسمون‌ها اشاره کرد.

گرافن یکی از شکل‌های ترکیبی کربن است که در آن اتم‌ها در یک شبکه شش ضلعی قرار گرفته‌اند و از برهم‌کنش‌های نور-ماده قابل توجهی برخوردار است [14]. تحرک‌پذیری زیاد الکترون‌ها، گاف انرژی قابل کنترل و کنترل‌پذیری پتانسیل شیمیایی با آلابیدن و اعمال ولتاژ از ویژگی‌های جذاب گرافن به شمار می‌روند که این ماده را به

5 Chaohan

6 Fabry-Perot

7 Insertion Loss

1 Mach-Zehnder

2 Slow Light

3 Self-Collimation

4 Surface Plasmon Polaritons (SPPs)

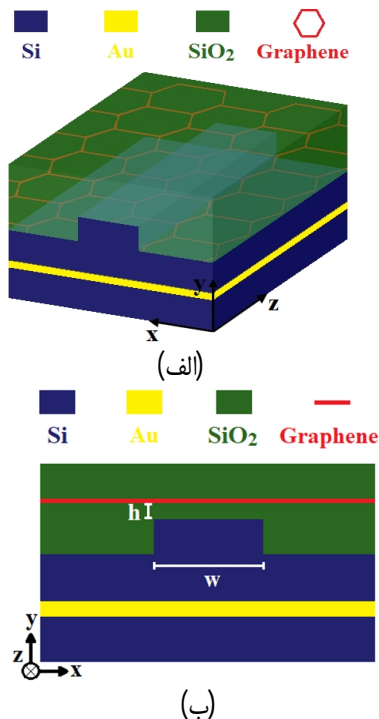
زیاد و تلفات کم گذردهی پلاسمون‌ها از مهم‌ترین ویژگی‌های افزاره طراحی شده هستند.

در بخش دوم، به طراحی و معرفی کلید پلاسمونی پیشنهادی پرداخته می‌شود. در بخش بعدی، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ارائه می‌شود و عملکرد افزاره پیشنهادی بحث و بررسی شد. در ادامه، به منظور ارزیابی کارایی کلید، نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش‌های دیگر مقایسه می‌شود. در پایان، خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده جمع‌بندی و ارائه می‌شود.

کلید پلاسمونی مبتنی بر گرافن

همان‌طور که در شکل 1-الف نشان داده شده است از سیلیکون به عنوان بستر ساختار پیشنهادی استفاده شده است. در بالای بستر، یک لایه طلا به ضخامت 100 نانومتر و یک لایه سیلیکون قرار داده شده است که یک برجستگی با ارتفاع 100 نانومتر در لایه سیلیکون شکل داده شده است. در ادامه، یک لایه از جنس دی‌اکسید سیلیکون قرار داده شده است که روی آن تک لایه‌ای از گرافن قرار دارد. در بالای گرافن، از یک لایه دی‌اکسید سیلیکون با ضخامت 200 نانومتر استفاده شده است. به منظور درک بهتر ساختار، نمای مقابل ساختار در شکل 1-ب رسم شده است.

با توجه به اختلاف پتانسیل اعمالی بین گرافن و طلا، پتانسیل شیمیایی گرافن تعیین می‌شود. به دلیل تفاوت ضریب



شکل 1. نمای (الف) سه بعدی و (ب) دو بعدی از کلید پلاسمونی پیشنهادی. کانال پلاسمونی در فاصله بین صفحه گرافن و برجستگی سیلیکونی با ارتفاع h و عرض w قرار دارد.

کلید پلاسمونی متشکل از یک تشدیدگر مستطیلی شکل از جنس ماده غیرخطی AuSiO₂ ارائه کردند. در این ساختار، از موج‌برهای افقی و عمودی به ترتیب برای سیگنال‌های داده و کنترل استفاده شده است. کلید پیشنهادی مساحت 0/593 میکرومتر مربع و نسبت تمایز 11/3 دسی‌بل دارد. الماسی منفرد و همکاران [23]، یک کلید الکترواپتیکی با استفاده از بلورهای فوتونی پلاسمونی یک بعدی و گرافن دولایه پیشنهاد کرده‌اند. آن‌ها با تحریک آرایه‌های فلزی متناوب، دو حالت بازتابی برای قطبش مغناطیسی در زاویه تابش 54 درجه به دست آوردند. طول 741 نانومتر و 1 ولت به ترتیب برای ابعاد سازه پیشنهادی و ولتاژ کلیدزنی گزارش شده است. ساهو و همکاران [24]، یک کلید تمام نوری مبتنی بر موج‌بر هیبریدی پلاسمونی با استفاده از اکسید کادمیوم آلاینده شده با روی پیشنهاد کردند. این اکسید که یک اکسید رسانای شفاف است می‌تواند با تنظیم الکتریکی ضریب شکست، از فاز دی‌الکتریک به فاز فلزی تبدیل شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نسبت خاموشی 13/75 دسی‌بل، تلفات الحاقی 0/5 دسی‌بل و ضریب شایستگی برابر 27/5 است. دهقان و همکاران [25]، یک ساختار کریستالی پلاسمونی بر اساس گرافن در بازه بسامدی تراهرتز طراحی کردند. آن‌ها نسبت خاموشی بیش از 30 دسی‌بل و مساحت ساختار 1 میکرومتر مربع را گزارش کرده‌اند. بررسی پژوهش‌های گفته شده نشان می‌دهد که طراحی

کلیدهای نوری کوچک یکی از زمینه‌های جذاب و کاربردی است که می‌تواند به طراحی افزاره‌های پیچیده و ترکیبی فشرده بیانجامد. در نتیجه، دستیابی به یک کلید نوری فشرده با بازده انتقالی زیاد از نیازهای اساسی در طراحی مدارهای نوری فشرده به شمار می‌رود. در این پژوهش، با بهره‌گیری از کنترل‌پذیری ویژگی‌های گرافن و قرارگیری یک لایه گرافن در نزدیکی برجستگی¹ سیلیکونی، پلاسمون‌های سطحی در نزدیکی گرافن و در یک کانال محصور شده و منتشر می‌شوند. بر این اساس، یک کلید الکترواپتیکی با مساحت 0/057 میکرومتر مربع طراحی می‌شود که نسبت به ساختارهای مشابه کوچک‌تر است. ضریب شایستگی 1246 نشان می‌دهد که ساختار طراحی شده به خوبی پلاسمون‌ها را هدایت می‌کند. تلفات انتشار پلاسمون‌ها در کلید به ازای بسامد 42 تراهرتز و پتانسیل شیمیایی 0/5 الکترون‌ولت برابر 0/31 دسی‌بل بر میکرومتر است و در بازه بسامدی 25 تا 45 تراهرتز تا 0/23 دسی‌بل بر میکرومتر نیز کاهش می‌یابد. اندازه کوچک، ضریب شایستگی²

1 Ridge

2 Figure-of-Merit

پراکندگی (Γ) 0/0001 الکترون ولت در نظر گرفته می‌شود. نفوذپذیری گرافن بر اساس رابطه زیر تعریف می‌شود [27]:

$$\epsilon_{||}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \epsilon_r + i \frac{\sigma_g(\omega, \mu_c, \Gamma, T)}{\epsilon_0 \omega \Delta} \quad (3)$$

پتانسیل شیمیایی گرافن (μ_c) با اعمال بایاس الکتریکی (V_b) تنظیم می‌شود و بر ویژگی‌های مختلف گرافن مانند رسانایی الکتریکی و تلفات انتشار پلاسماهای سطحی اثرگذار است. رابطه (4) ارتباط پتانسیل شیمیایی گرافن با ولتاژ اعمالی را بیان می‌کند [28].

$$\mu_c(V) = h v_F \left[\frac{2.25 \times 10^{16} (V_b - 0.8)}{\pi} \right]^{0.5} \quad (4)$$

در این رابطه، h ثابت پلانک و v_F سرعت فرمی گرافن است.

شبیه‌سازی و بحث

برای حل معادلات ماکسول از روش عددی تفاضل محدود حوزه زمان² (FDTD) استفاده می‌شود و در این پژوهش، نسخه 8/24 نرم‌افزار تجاری لومریکال برای شبیه‌سازی به کار گرفته شده است. در روش FDTD، مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی در حوزه زمان و مکان به صورت یک در میان محاسبه می‌شوند. در این پژوهش، با استفاده از شرط کورانت، سلول‌های پایه در تمام جهت‌ها به اندازه 0/1 نانومتر انتخاب می‌شوند. گام زمانی در محاسبه مولفه‌های زمانی برابر 5/7 اتونانیه در نظر گرفته می‌شود.

ضریب شکست موثر کانال (n_{eff})، مهم‌ترین پارامتر در هدایت پلاسماهای سطحی است. بخش حقیقی ضریب شکست ($Re(n_{eff})$) به محصورشدگی امواج توسط کانال مرتبط است و هر چه مقدار آن در مقایسه با نواحی کناری بیشتر باشد محصورشدگی بیشتر امواج تراهترت رخ خواهد داد. بخش موهومی ضریب شکست ($Im(n_{eff})$) بیانگر تلفات کانال است و هر چه اندازه آن کمتر باشد، مطلوب‌تر است. رابطه (5) تلفات کانال (α) را بیان می‌کند [29].

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega}{c} \text{Im}(n_{eff}) \quad (5)$$

در این رابطه، c سرعت نور در خلا است. شکل 2 بخش‌های حقیقی و موهومی ضریب شکست بر حسب عرض کانال را برای سه مود انتشاری پایه، 1 و 2 و به ازای ارتفاع کانال 10 نانومتر نشان می‌دهد. پتانسیل شیمیایی گرافن 0/5 الکترون ولت و بسامد رادیانی 42 تراهترت در نظر گرفته شده است.

شکست بین گرافن و دی‌اکسید سیلیکون، پلاسماون پلاریتون‌های سطحی در نزدیکی گرافن محصور می‌شوند و در راستای محور Z منتشر می‌شوند. در واقع، در فاصله بین گرافن و برجستگی سیلیکونی یک کانال پلاسماونی با ارتفاع h و عرض w به وجود می‌آید که پلاسماون پلاریتون‌های سطحی در آن محصور می‌شوند. با اعمال ولتاژ مناسب به صفحه گرافنی، می‌توان ضریب شکست کانال را تغییر داد و به این ترتیب بازده انتقال امواج تراهترت را تنظیم کرد.

به ازای قطبش TM و با در نظر گرفتن وسط تک لایه گرافن به عنوان مبدا مختصات، می‌توان معادلات ماکسول را به صورت زیر بازنویسی کرد که E میدان الکتریکی و H میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند [26].

$$\frac{\partial H_x}{\partial y} = -j\omega \epsilon_1 \epsilon_0 E_z \quad (\text{الف-1})$$

$$H_x = \frac{-j\omega \epsilon_1 \epsilon_0 E_y}{k_y} \quad (\text{ب-1})$$

در این رابطه، ϵ نفوذپذیری، ω بسامد رادیانی و k عدد موج است. اگر لایه دی‌اکسید سیلیکون بالای گرافن، کانال پلاسماونی و برجستگی به ترتیب نواحی 1 تا 3 نام‌گذاری شوند و متغیر $i=1,2,3$ شماره هر ناحیه را نشان دهد. معادلات حاکم بر سه لایه مذکور به ترتیب به صورت زیر است:

$$H_x = A e^{jk_1 y},$$

$$E_y = \frac{jk_1 A}{\omega \epsilon_1 \epsilon_0} e^{jk_1 y}, \quad (\text{الف-2})$$

$$E_z = \frac{-k_1 A}{\omega \epsilon_1 \epsilon_0} e^{jk_1 y}$$

$$H_x = B e^{-jk_2 y} + C e^{jk_2 (y+h)},$$

$$E_y = \frac{jk_2}{\omega \epsilon_2 \epsilon_0} [B e^{-jk_2 y} - C e^{jk_2 (y+h)}], \quad (\text{ب-2})$$

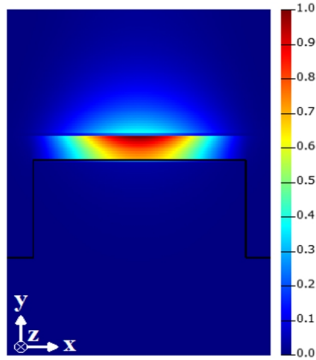
$$E_z = \frac{k_2}{\omega \epsilon_2 \epsilon_0} [B e^{-jk_2 y} - C e^{jk_2 (y+h)}]$$

$$H_x = D e^{-jk_3 (y+h)},$$

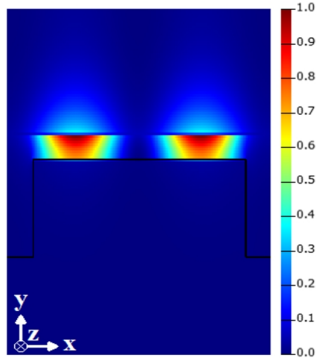
$$E_y = \frac{jk_3 D}{\omega \epsilon_3 \epsilon_0} e^{-jk_3 (y+h)}, \quad (\text{ج-2})$$

ضرایب A, B, C و D دامنه مود انتشاری پایه را نشان می‌دهند. برای مولفه‌های مماسی در سطح مشترک بین نواحی 1 و 2 تساوی $E_z^1 = E_z^2$ و $H_x^1 - H_x^2 = \sigma_g E_z$ برای سطح مشترک بین نواحی 2 و 3 تساوی $H_x^2 = H_x^3$ و $E_z^2 = E_z^3$ برقرار است. رسانایی گرافن که در شرط مرزی اثرگذار است با رابطه کوبو¹ مدل می‌شود و انتقال درون‌باند و بین‌باند را شامل می‌شود. ضخامت تک لایه گرافن (Δ) 0/4 نانومتر و نرخ

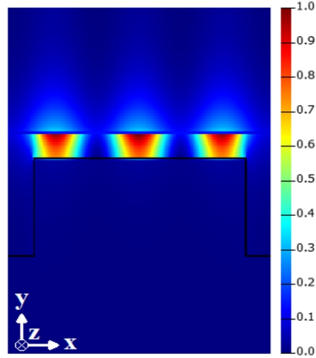
سطحی به ازای عرض کانال 200 نانومتر را برای مدهای پایه، 1 و 2 نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

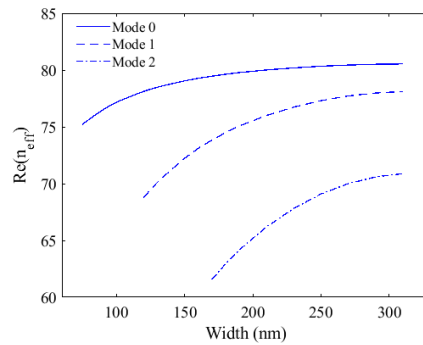


(ج)

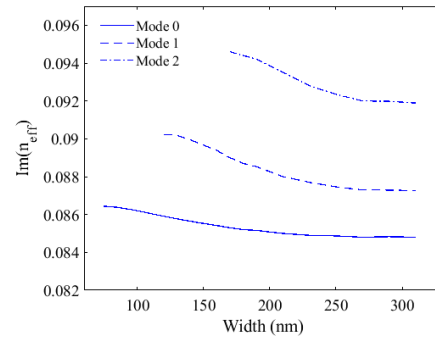
شکل 3. محصورشدگی مدهای پایه، 1 و 2 در کانال پلاسمونی به ازای عرض 80 نانومتر و ارتفاع 10 نانومتر.

به منظور بررسی عملکرد کانال در بسامدها و مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی گرافن، تلفات کانال به ازای تغییر بسامد از 25 تا 45 تراهرتز محاسبه شده است (شکل 4). می‌توان مشاهده کرد که با افزایش بسامد، تلفات نیز بیشتر می‌شود که این موضوع در رابطه (5) نشان داده شده است. شبیه‌سازی نشان می‌دهد به ازای تغییر پتانسیل شیمیایی از 0/1 تا 0/5 الکترون‌ولت و تغییر بسامد از 25 تا 45 تراهرتز، تلفات کانال از 78/03 دسی‌بل بر میکرومتر تا 0/23 دسی‌بل بر

با توجه به شکل 2 می‌توان مشاهده کرد به ازای عرض کانال کوچک‌تر از 120 نانومتر، کانال طراحی شده فقط مود انتشاری پایه (مود انتشاری صفر) را هدایت می‌کند. به ازای عرض کوچک‌تر از 170 نانومتر، مود انتشاری 1 نیز می‌تواند در کانال انتشار یابد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد به ازای تغییر عرض کانال از 75 تا 310 نانومتر، اندازه مولفه‌های حقیقی و موهومی ضریب شکست کانال برای مود انتشاری پایه به ترتیب از 75/2 تا 80/5 و از 0/0864 تا 0/0848 تغییر می‌کنند. بر این اساس، می‌توان گفت که کانال پلاسمونی پیشنهادی می‌تواند مود انتشاری پایه پلاسمون پلاریتون‌های سطحی را به خوبی محصور کرده و در راستای طول کانال انتشار دهد.



(الف)



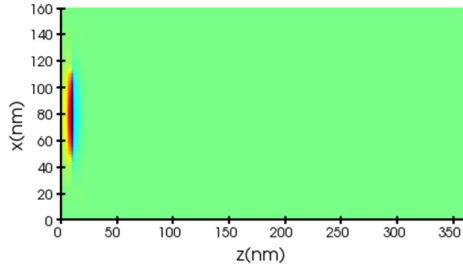
(ب)

شکل 2. مولفه‌های (الف) حقیقی و (ب) موهومی ضریب

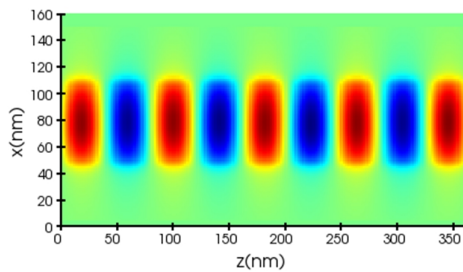
شکست موثر کانال برحسب عرض آن و با ارتفاع 10 نانومتر.

اگرچه به ازای کانال‌های با عرض کم‌تر از 120 نانومتر می‌توان فقط مود انتشاری پایه را هدایت کرد اما کوچک‌تر کردن عرض می‌تواند به کاهش سطح مقطع افزاره بیانجامد. کاهش بیش از اندازه عرض می‌تواند باعث افزایش نشتی میدان به نواحی مجاور شود و هم‌شنوایی ساختار را افزایش دهد. شبیه‌سازی نشان می‌دهد به ازای ارتفاع کانال بیش از 10 نانومتر، تغییرات موثری در مولفه حقیقی ضریب شکست کانال و محصورشدگی پلاسمون‌ها رخ نمی‌دهد. بنابراین، عرض و ارتفاع کانال به ترتیب برابر 80 نانومتر و 10 نانومتر انتخاب می‌شوند. شکل 3 محصورشدگی پلاسمون پلاریتون‌های

الکترون ولت، نور ورودی به درگاه خروجی می‌رسد. این نتیجه، عمل کلیدزنی را معادل‌سازی می‌کند که می‌توان گفت که گذر نور ورودی به خروجی به صورت الکتریکی کنترل می‌شود. به عبارت دیگر، ساختار ارائه شده یک کلید الکترواپتیکی را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

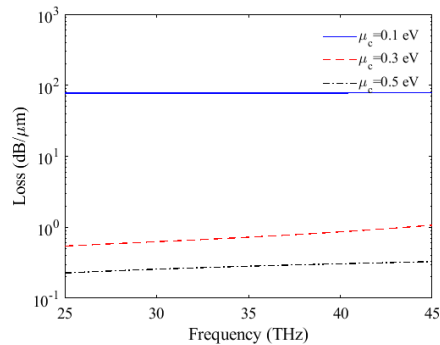
شکل 5. توزیع میدان الکتریکی در صفحه xz و چگونگی انتشار پلاسمون‌های سطحی در جهت z به ازای پتانسیل شیمیایی (الف) $0/1$ الکترون ولت و (ب) $0/5$ الکترون ولت. یکی از پارامترهای مهم افزاره‌های پلاسمونی مبتنی بر موج‌بر، طول تزویج کانال (L_c) است که به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود [30].

$$L_c = \frac{\pi}{2\Delta\beta} \quad (6)$$

$\Delta\beta$ برابر با $(\beta_s - \beta_a)/2$ است و β_a و β_s ثابت‌های انتشار متقارن و غیر متقارن هستند. شکل 5 طول تزویج بر حسب فاصله کانال از یک کانال مشابه دیگر را به ازای $w=80$ نانومتر، $H=10$ نانومتر، $\mu_c=0/5$ الکترون ولت و $\omega=42$ تراهرتز نشان می‌دهد. هرچه فاصله دو کانال از هم بیشتر شود اندازه طول تزویج به صورت نمایی افزایش می‌یابد. طول تزویج، مسافتی است که توان ورودی به یک کانال به صورت کامل به کانال مجاور تزویج می‌شود. بر اساس شکل 6، طول تزویج کانال به ازای فاصله 20 تا 100 نانومتر از کانال مجاور، از $6/1$ تا $883/3$ میکرومتر تغییر می‌کند. با توجه به ابعاد کوچک ساختارهای پلاسمونی، می‌توان گفت که طول تزویج به دست آمده مناسب است و می‌تواند به هم‌شنوایی کم در کانال‌های مجاور بیانجامد.

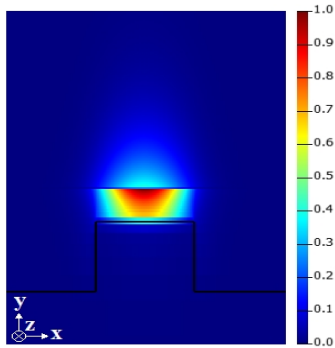
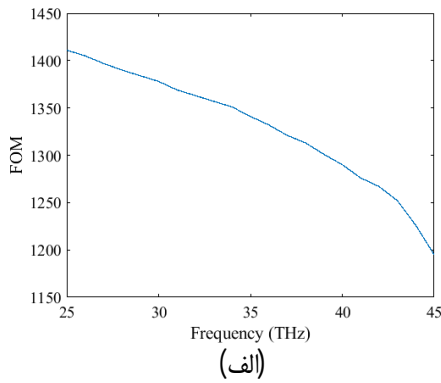
ضریب شایستگی (FOM) به عنوان نسبت مولفه حقیقی به مولفه موهومی ضریب شکست با رابطه (7) تعریف می‌شود

میکرومتر کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت با تنظیم پتانسیل شیمیایی بزرگ‌تر، تلفات گذردهی کانال کمتر می‌شود. پتانسیل شیمیایی همان تراز فرمی است و با اعمال ولتاژ بزرگ‌تر به گرافن، مقدار پتانسیل شیمیایی بیشتر شده و تراز فرمی گرافن بالاتر می‌رود. در نتیجه، احتمال جذب پلاسمون‌ها و پر شدن ترازهای بالاتر کاهش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود پلاسمون‌های کم‌تری جذب شوند. به این ترتیب تلفات کانال که شامل تلفات جذبی گرافن می‌شود با افزایش پتانسیل شیمیایی کمتر می‌شود. بر اساس رابطه (4)، با اعمال ولتاژ بایاس $1/5$ و $8/3$ ولت می‌توان به پتانسیل شیمیایی $0/1$ و $0/5$ دست یافت.



شکل 4. تلفات کانال پلاسمونی بر حسب بسامد به ازای پتانسیل شیمیایی $0/1$ ، $0/3$ و $0/5$ الکترون ولت.

با توجه به شکل‌های 2 تا 4 می‌توان گفت که کنترل گذردهی کانال در حالت تک مود انتشاری پایه برای پلاسمون‌های سطحی با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن امکان‌پذیر است. با توجه به تلفات کم کانال در پتانسیل شیمیایی $0/5$ الکترون ولت و تلفات بسیار زیاد کانال در پتانسیل شیمیایی $0/1$ الکترون ولت می‌توان کارکرد کانال را به دو حالت قطع و وصل گذر سیگنال نسبت داد. برای نشان دادن این موضوع، در شکل 5 توزیع میدان الکتریکی در صفحه xz به ازای μ_c های برابر با $0/1$ و $0/5$ الکترون ولت رسم شده است. هنگامی که پتانسیل شیمیایی برابر با $0/1$ الکترون ولت باشد میدان الکتریکی به طور نمایی در جهت انتشار (جهت z) تضعیف می‌شود. بنابراین تقریباً هیچ توانی به انتهای کانال نمی‌رسد (شکل 5 الف). با تنظیم پتانسیل شیمیایی برابر با $0/5$ الکترون ولت، سطح فرمی افزایش می‌یابد بنابراین با توجه به قضیه پائولی، تعداد کمی از پلاسمون پلاریتون‌های سطحی جذب شده و تلفات بسیار کم خواهد شد، در نتیجه نور به انتهای کانال می‌رسد (شکل 5 ب). اگر ابتدا و انتهای کانال را به عنوان درگاه‌های ورودی و خروجی در نظر بگیریم به ازای پتانسیل شیمیایی $0/1$ الکترون ولت، نور از درگاه ورودی به درگاه خروجی نمی‌رسد در حالی که با تنظیم μ_c برابر با $0/5$



(ب)

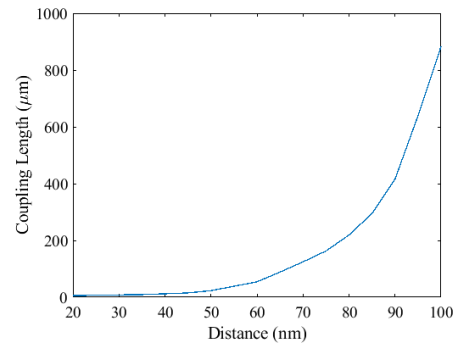
شکل 7. الف) ضریب شایستگی گذردهی کانال به ازای تغییر بسامد از 25 تا 45 تراهرتز، (ب) توزیع میدان الکتریکی در صفحه xy به ازای بسامد 42 تراهرتز.

تلفات گذردهی به ازای فرکانس 42 تراهرتز فقط 0/31 دسی‌بل بر میکرومتر است که در مقایسه با کانال‌های دیگر کم‌تر است. این ویژگی نیز بسیار مورد توجه طراحان حوزه نور است چون تلفات سیگنال باعث افزایش دمای ساختار، هم‌سنوایی و نویز ساختار می‌شود و کارایی افزاره طراحی شده را کاهش می‌دهد. در ساختارهای ترکیبی که بخش‌های مختلفی با یکدیگر در ارتباط هستند تلفات کانال‌های ارتباطی می‌تواند باعث ایجاد خطا در خروجی نهایی شود. به عنوان نمونه، در یک افزاره دیجیتالی، در صورت افت توان سیگنال ممکن است بیت ارسالی در قالب منطق 1، به درستی در بخش‌های دیگر دریافت نشود و آن را به عنوان بیت 0 انتقال اطلاعات رمز شده دیجیتال به عنوان یک ضرورت محسوب می‌شود.

از آنجایی که محصورشدگی سیگنال در کانال و کاهش تلفات دو مولفه اساسی در گذردهی اطلاعات نوری به شمار می‌روند معیار ضریب شایستگی می‌تواند ترکیب این دو مولفه را به خوبی نشان دهد. هر چه مقدار ضریب شایستگی بیشتر باشد نشان دهنده توانایی افزاره در هدایت سیگنال است. جدول 1 نشان می‌دهد ضریب شایستگی ساختار طراحی شده برابر

[31]

$$\text{FOM} = \frac{\text{Re}(n_{\text{eff}})}{\text{Im}(n_{\text{eff}})} \quad (7)$$



شکل 6. طول تزویج کانال بر حسب فاصله‌های مختلف از یک کانال مشابه مجاور.

محصور شدن بیشتر نور به مقدار بالاتر بخش حقیقی ضریب شکست مربوط می‌شود و مقدار کم‌تر بخش موهومی ضریب شکست، تلفات گذردهی کم‌تر را نتیجه می‌دهد. بر این اساس، مقدار بیشتر ضریب شایستگی باعث عملکرد بهتر برای کلیدزنی می‌شود. شکل 7-الف نشان می‌دهد به ازای تغییر بسامد از 25 تا 45 تراهرتز، ضریب شایستگی کانال از 1411 به 1195 کاهش می‌یابد. بر اساس رابطه (4)، افزایش بسامد باعث افزایش تلفات یا همان مولفه موهومی ضریب شده و در نتیجه مطابق رابطه (7)، ضریب شایستگی را کم می‌کند. شکل 7-ب ازای بسامد 42 تراهرتز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پلاسمون‌ها در فاصله بین گرافن و برجستگی سیلیکونی یا همان کانال پلاسمونی به خوبی متمرکز شده‌اند.

به منظور ارزیابی بهتر کارکرد کلید پلاسمونی طراحی شده، نتایج به دست آمده از آن در جدول 1 با پژوهش‌های دیگر مقایسه شده است. این جدول داده‌های به دست آمده را در قالب اندازه ساختار، تلفات گذردهی، طول تزویج و ضریب شایستگی ارائه می‌کند. جدول 1 نشان می‌دهد که مساحت ساختار طراحی شده 0/057 میکرومتر مربع و نسبت به ساختارهای دیگر کوچک‌تر است. این ویژگی یکی از نیازهای اساسی در مدارهای مجتمع نوری است و امکان به‌کارگیری آن در ساخت افزاره‌های مبتنی بر کلیدزنی در حوزه آنالوگ و دیجیتال را فراهم می‌کند. در افزاره‌هایی که تعداد ورودی و خروجی زیادی دارند و بر اساس کلیدزنی، مسیر حرکت سیگنال را کنترل می‌کنند به تعداد کلیدهای زیادی نیاز دارند بنابراین؛ کوچک‌سازی کلیدهای پایه نقش مهمی در طراحی مدارها و ساختارهای پیچیده دارد.

در ساختارهای مختلف حوزه آنالوگ و دیجیتال باشد و انتقال نور و تغییر مسیر در ابعاد کوچک را ممکن سازد.

نتیجه گیری

در این مقاله، یک کلید بسیار کوچک الکترواپتیکی مبتنی بر گرافن برای هدایت پلاسمون پلاریتون‌های سطحی طراحی شده است. استفاده از یک برجستگی سیلیکونی در نزدیکی تک لایه گرافنی باعث می‌شود بتوان پلاسمون‌ها را در یک کانال محصور کرد. با اعمال ولتاژ بایاس می‌توان پتانسیل الکتریکی گرافن را به گونه‌ای تنظیم کرد که تلفات گذردهی سیگنال، بسیار کم یا بسیار زیاد باشد. نشان داده شد به ازای پتانسیل شیمیایی 0/1 الکترون‌ولت تلفات کانال تا 78/03 دسی‌بل بر میکرومتر افزایش می‌یابد و نوری در آن منتشر نمی‌شود. به ازای پتانسیل شیمیایی 0/5 الکترون‌ولت، تلفات گذردهی سیگنال تا 0/23 دسی‌بل بر میکرومتر کاهش می‌یابد و نور در کانال هدایت می‌شود. اندازه کلید طراحی شده برابر 0/057 میکرومتر مربع است و در مقایسه با ساختارهای مشابه یک ویژگی ممتاز به شمار می‌رود. ضریب شایستگی 1246 نشان می‌دهد که سیگنال نوری ترانزیت به خوبی در کانال طراحی شده محصور شده و منتشر می‌شود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش توسط دانشگاه شهید چمران اهواز به شماره پژوهانه SCU.EE1402.672 مورد حمایت قرار گرفته است. نویسندگان مراتب قدردانی خود را بابت حمایت مذکور اعلام می‌دارند.

References

- [1] M. J. Maleki, M. Soroosh, A. Mir, Ultra-fast all-optical 2-to-4 decoder based on a photonic crystal structure, *Applied Optics* 59 (2020) 5422-5428.
- [2] M. J. Maleki, M. Soroosh, A. Mir, Improving the performance of 2-to-4 optical decoders based on photonic crystal structures. *Crystals* 9 (2019) 635.
- [3] M. Makvandi, M. J. Maleki, M. Soroosh, Compact all-optical encoder based on silicon photonic crystal structure, *Journal of Applied Research in Electrical Engineering* 1 (2021) 1-7.
- [4] M. J. Maleki, and M. Soroosh, Design and simulation of a compact all-optical 2-to-1 digital multiplexer based on photonic crystal resonant cavity, *Opt Quant Electron* 54 (2022)

1246 و بیش از منابع دیگر است. این موضوع به تمرکز پلاسمون‌ها در مرکز کانال و زیر لایه گرافن مربوط می‌شود. نشستی اندک توان به نواحی کناری و محصورشدگی سیگنال به کمک برجستگی سیلیکونی باعث تلفات کم ساختار و گذردهی مناسب کانال می‌شود. تمرکز قوی پلاسمون‌ها و کاهش نشستی توان نوری به نواحی مجاور باعث افزایش طول تزویج می‌شود و کاهش هم‌نشوایی را نتیجه می‌دهد. با کوچک‌سازی ساختارها و نزدیکی موج‌برها به یکدیگر، نشستی توان از یک موج‌بر به موج‌بر دیگر بیش از پیش خودنمایی می‌کند و باعث ایجاد محدودیت‌های اساسی در مجتمع‌سازی ساختارها می‌شود. محصورشدگی قوی سیگنال نوری و افزایش طول تزویج راهکارهای مناسبی برای غلبه بر چالش مذکور هستند که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته‌اند.

جدول 1. مقایسه نتایج به‌دست آمده با کارهای دیگران.

منبع	اندازه (μm^2)	تلفات (dB/ μm)	طول تزویج (μm)	ضریب شایستگی
[19]	0/263	2/86	-	-
[20]	0/386	1/43	146	33/31
[21]	0/137	0/39	189	-
[22]	0/593	2/18	-	-
[23]	0/741	3/07	-	-
[24]	-	0/5	-	27/5
[25]	1	2/74	-	-
این پژوهش	0/057	0/31	218/2	1246

سرعت کلیدزنی افزاره به مقاومت الکتریکی اتصالات وابسته است و با چگونگی فرآیند ساخت و کیفیت لایه نشانی اتصالات مرتبط است. مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش با پژوهش‌های دیگر نشان می‌دهد که کلید الکترواپتیکی طراحی شده می‌تواند با ارائه تلفات کم، ضریب شایستگی زیاد و اندازه کوچک گزینه مناسبی برای به‌کارگیری

- [5] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, A compact high-performance decoder using the resonant cavities in photonic crystal structure, *Opt Quant Electron* 55 (2023) 852.
- [6] K. Heydarian, A. Nosratpour, M. Razaghi, Design and analysis of an all-optical NAND logic gate using a photonic crystal semiconductor optical amplifier based on the Mach-Zehnder interferometer structure, *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 49 (2022) 100992.
- [7] S. Mohammadi Pouyan, S. Bahadori Haghghi, M. Heidari, D. Abbott, High-performance Mach-Zehnder modulator using tailored plasma dispersion effects in an ITO/graphene-based waveguide, *Sci Rep* 12 (2022) 12738.
- [8] A. Hamouleh Alipour, A. Mir, A. Farmani,

- Analytical modeling and design of a graphene metasurface sensor for thermo-optical detection of terahertz plasmons, *IEEE Sensors Journal* 21 (2020) 4525-4532.
- [9] F. Haddadan, and M. Soroosh, Design and simulation of a subwavelength 4-to-2 graphene-based plasmonic priority encoder, *Optics & Laser Technology* 157 (2023) 108680.
- [10] Q. Gong, and X. Hu, *Photonic crystals: principles and applications*, 1st ed. Jenny Stanford Publishing, Florida (2014) 2-12.
- [11] A. Deyasi, P. Debnath, A. K. Datta, S. Bhattacharyya, *Photonics, Plasmonics and Information Optics: Research and Technological Advances*. 1st ed. CRC Press, Florida, (2021).
- [12] Gric T., *Plasmonics*, 1st ed. Intechopen, London, (2018) 3-6.
- [13] T. V. Shahbazyan and M. I. Stockman, *Plasmonics: Theory and Applications*, 1st ed. Springer Dordrecht, Dordrecht, (2018) 3-17.
- [14] V. Skákalová and A. B. Kaiser, *Graphene: Properties, Preparation, Characterization and Applications*. 2nd ed. Woodhead Publishing, Sawston, (2021) 2-11.
- [15] F. Haddadan, M. Soroosh, N. Alaei Sheini, Cross-talk reduction in a graphene-based ultra-compact plasmonic encoder using an Au nano-ridge on a silicon substrate, *Applied Optics* 61 (2022) 3209-3217.
- [16] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, A subwavelength graphene surface plasmon polariton-based decoder, *Diamond and Related Materials* 134 (2023) 109780.
- [17] Z. Saleh nezhad, M. Soroosh, A. Farmani, Design and numerical simulation of a sensitive plasmonic-based nanosensor utilizing MoS₂ monolayer and graphene, *Diamond and Related Materials* 131 (2023) 109594.
- [18] M. Mohammadi, M. Soroosh, A. Farmani, S. Ajabi, Engineered FWHM enhancement in plasmonic nanoresonators for multiplexer/demultiplexer in visible and NIR range, *Optik* 274 (2023) 170583.
- [19] Y. Karimi, H. Kaatuzian, A. Tooghi, M. Danaie, All-optical plasmonic switches based on Fano resonance in an X-shaped resonator coupled to parallel stubs for telecommunication applications, *Optik* 243 (2021) 167424.
- [20] D. Chauhan, A. Kumar, R. Adhikari, R. K. Saini, S. H. Chang, R. P. Dwivedi, High performance vanadium dioxide based active nano plasmonic filter and switch, *Optik*, 225 (2021) 165672.
- [21] H. Emami Nejad, A. Mir, A. Farmani, R. Talebzadeh, A silicene-based plasmonic electro-optical switch in THz range, *Physica Scripta* 98 (2022) 015803.
- [22] S. Khani, M. Danaie, P. Rezaei, Plasmonic all-optical metal-insulator-metal switches based on silver nano-rods, comprehensive theoretical analysis and design guidelines, *J Comput Electron* 20 (2021) 442-457.
- [23] S. A. Monfared, M. Seifouri, S M. Hamidi, S. M. Mohseni, Electro-optical switch based on one-dimensional graphene-plasmonic crystals, *Optical Materials* 115 (2021) 111051.
- [24] S. K. Sahu, and M. Singh, High-Performance All-Optical Hybrid Plasmonic Switch Using Zn-Doped Cadmium Oxide, *IEEE Transactions on Plasma Science* 51 (2023) 605-612.
- [25] M. Dehghan, M. K. Moravvej Farshi, M. Jabbari, G. Darvish, M. Ghaffari Miab, Bidirectional terahertz plasmonic switch based on periodically structured graphene, *JOSA B* 40 (2023) 1773-1778.
- [26] Y. Sun, Z. Zheng, J. Cheng, J. Liu, Graphene surface plasmon waveguides incorporating high-index dielectric ridges for single mode transmission, *Optics Communications* 328 (2014) 124-128.
- [27] D. Chatzidimitriou, A. Pitolakis, E. E. Kriezis, Rigorous calculation of nonlinear parameters in graphene-comprising waveguides, *Journal of Applied Physics* 118 (2015) 023105.
- [28] M. Liu, X. Yin, E. Ulin Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, X. Zhang, A graphene-based broadband optical modulator, *Nature* 474 (2011) 64-67.
- [29] H. C. Casey, and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers, Part A Fundamental Principles*, 1st ed. Academic Press, New York, (1978) 22-51.
- [30] Y. Bian, Q. Ren, L. Kang, Y. Qin, P. L. Werner, D. H. Werner, Efficient cross-talk reduction of nanophotonic circuits enabled by fabrication friendly periodic silicon strip arrays. *Sci Rep* 7 (2017) 15827.
- [31] P. Y. Chen, C. Argyropoulos, A. Alu, Terahertz antenna phase shifters using integrally-gated graphene transmission-lines, *IEEE Transactions on antennas and propagation* 61 (2013) 1528-1537.