

ORIGINAL ARTICLE

Design and Simulation of Compact Plasmonic Decoder with High Contrast Ratio for Propagation of Graphene Surface Plasmon Polaritons

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

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

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

3 Associate Professor, Department of Electrical 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. (2024). Design and Simulation of Compact Plasmonic Decoder with High Discrimination Ratio for Propagation of Graphene Surface Plasmon Polaritons, Optoelectronic, 6(2), 11-18.

ABSTRACT

In this research, using graphene nano-ribbons on silicon dioxide, a plasmonic channel with high confinement has been designed for guiding surface plasmon polaritons. By adjusting the chemical potential of graphene, the channel's conductivity can be controlled. Simulation results show that by applying voltages of 1.5 and 8.3 volts to graphene nano-ribbons can obtained chemical potentials of 0.1 and 0.5 electron volts, and change the channel losses from 88.23 to 0.91 dB/ μm . Accordingly, two logical states of zero and one and key switching operation can be realized. The figure-of-merit of 975.43 shows that there is a good ratio between the confinement of surface plasmons and their propagation loss. The coupling length of 99.1 μm shows that the power leakage to adjacent channel can be controlled and the small size of the proposed decoder, which is equal to 1.92 μm^2 shows the importance of power leakage control. The discrimination ratio of the decoder is 45.73 dB, demonstrating the ability of the device to distinguish logical levels of one and zero. Comparison of the structure obtained in this research with other works confirms that the proposed design has been able to improve the performance of the optical decoder.

KEYWORDS

Surface Plasmon Polariton, Optical Decoder, Plasmonic Channel, Electro-Optic Switch, Graphene.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

طراحی و شبیه‌سازی رمزگشای پلاسمونی فشرده با نسبت تمایز بالا برای انتشار پلاسمون پلاریتون‌های سطحی گرافن

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

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از نانونوارهای گرافنی روی دی‌اکسید سیلیکون، یک کانال پلاسمونی با محصورکنندگی زیاد برای هدایت پلاسمون پلاریتون‌های سطحی طراحی شده است. با تنظیم پتانسیل شیمیایی گرافن می‌توان گذردهی کانال را کنترل کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند با اعمال ولتاژهای 1/5 و 8/3 ولت به نانونوار گرافنی می‌توان پتانسیل شیمیایی 0/1 و 0/5 الکترون ولت را به‌دست آورد و تلفات کانال را از 88/23 تا 0/91 دسی‌بل بر میکرومتر تغییر داد. بر این اساس، دو حالت صفر و یک منطقی و عمل کلیدزنی را می‌توان تحقق بخشید. ضریب شایستگی 975/43 نشان می‌دهد که نسبت خوبی بین محصورشدگی پلاسمون‌های سطحی و تلفات انتشار آنها برقرار است. طول تزویج 99/1 میکرومتر نشان می‌دهد که می‌توان نشی توان به کانال مجاور را کنترل کرد و اندازه کوچک رمزگشای پیشنهادی که برابر 1/92 میکرومتر مربع است اهمیت کنترل نشی توان را بیان می‌کند. نسبت تمایز رمزگشا 45/73 دسی‌بل است که توانایی افزاره در تفکیک سطوح منطقی یک و صفر را نشان می‌دهد. مقایسه ساختار به‌دست آمده از این پژوهش با کارهای دیگر تایید می‌کند که طرح پیشنهادی توانسته است بهبود عملکرد رمزگشای نوری را نتیجه دهد.

واژه‌های کلیدی

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

1 دانشجوی دکترا، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
2 استاد، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
3 دانشیار، گروه مهندسی برق، 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 رمزگشای پلاسمونی فشرده با نسبت تمایز بالا برای انتشار پلاسمون پلاریتون‌های سطحی گرافن. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(2)، 11-18.

مقدمه

امروزه نیاز به پردازش اطلاعات با سرعت بالا باعث شده است که به طراحی مدارهای نوری توجه زیادی شود. دلیل این امر سرعت شگفت‌انگیز امواج نوری در مقایسه با الکترون‌ها است که منجر به انتقال داده از طریق امواج نوری به عنوان حامل می‌شود [1]. مدارهای تمام نوری را می‌توان در سه گروه متشکل از افزاره‌های بلور فوتونی¹، افزاره‌های مبتنی بر پلاسمون‌ها و نیز ساختارهای ماخ زندی² طبقه‌بندی کرد. ایراد اصلی ساختارهای مبتنی بر بلورهای فوتونی [2-6] و ماخ زندی [7] سطح مقطع زیاد آن‌ها است در حالی که ساختارهای مبتنی بر پلاسمون پلاریتون‌های سطحی³ (SPPs) امکان محصورسازی نور در ابعاد بسیار کوچک را فراهم می‌سازند، بنابراین با توجه به فرآیند مجتمع‌سازی افزاره‌ها گزینه مناسبی برای طراحی افزاره‌های نوری محسوب می‌شوند. پلاسمون‌های سطحی به صورت نوسان الکترون‌های باند ظرفیت ناشی از اعمال میدان مغناطیسی تعریف می‌شوند. با توجه به قابلیت محصورسازی نور در اندازه‌های کوچک، افزاره‌های پلاسمونی مختلفی از جمله موجبرها [8]، رمزگذارها⁴ [9]، فلیپ فلاپ‌ها⁵ [10] و مالتی پلکسر/ دیمالتی پلکسرها⁶ [11] ارائه شده است.

گرافن به عنوان یکی از ساختارهای اتم کربن دارای چیدمانی دو بعدی و متشکل از یک لایه منفرد با شبکه لانه زنبوری است. تحرک‌پذیری بالای حامل‌ها، گاف انرژی تنظیم‌پذیر و کنترل‌شوندگی پتانسیل شیمیایی⁷ (μ_c) با آلایدن یا اعمال ولتاژ از ویژگی‌های شاخص گرافن به شمار می‌روند که این ماده را به عنوان یک لایه نازک موثر در طراحی ساختارها مطرح کرده‌اند. نشان داده شده است که استفاده از گرافن در ساختارهای پلاسمونی به جای فلزهای نجیب باعث کاهش تلفات انتشار می‌شود بنابراین در این پژوهش، از گرافن در طراحی افزاره پیشنهادی استفاده شده است [12].

یکی از ریزساختارهای مهم در پردازش اطلاعات رمزگشاها هستند. رمزگشای مداری است که دارای n ورودی و 2^n خروجی است که بسته به ترکیب سیگنال‌های ورودی، در هر لحظه تنها یکی از خروجی‌های آن فعال می‌شود. گوسوامی⁸ و

همکاران [13] ساختاری مبتنی بر بلورهای فوتونی برای رمزگشای 1 به 2 ارائه کردند. افزاره پیشنهادی دارای آرایش شش ضلعی از سوراخ‌های هوا است که در یک بستر سیلیکونی ایجاد شده‌اند. مساحت مورد نیاز برای ساختار پیشنهادی 215 میکرومتر مربع و نسبت تمایز⁹ 10 دسی‌بل گزارش شده است. موندال¹⁰ و همکاران [14]، یک رمزگشای 1 به 2 مبتنی بر بلورهای فوتونی دو بعدی ارائه کردند که ساختار پیشنهادی بر اساس اصل تداخل نوری در موجبرهای بلور فوتونی عمل می‌کند. آنها از سیلیکون به عنوان ماده اصلی برای میله‌های بلور فوتونی پایه استفاده کردند. افزاره پیشنهادی دارای نسبت تمایز 11/3 دسی‌بل است و مساحت 234 میکرومتر مربع را اشغال می‌کند. ملکی و همکاران [15] یک رمزگشای پلاسمونی 2 به 4 مبتنی بر گرافن ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از تحریک پلاسمون پلاریتون‌های سطحی موجود در سطح مشترک گرافن-SiO₂ موفق به ارائه ساختاری شدند که دارای مساحت 2/1 میکرومتر مربع و نسبت تمایز 36/43 دسی‌بل است. از پارامترهای دیگر گزارش شده در این پژوهش می‌توان به هم شنوایی 36/65- دسی‌بل و طول تزویج 214/2 میکرومتر اشاره کرد.

در این پژوهش، یک ساختار زیر طول موج مبتنی بر پلاسمون پلاریتون‌های سطحی برای یک رمزگشای پایه ارائه می‌شود که علاوه بر ابعاد کوچک (1/92 میکرومتر مربع)، تلفات انتشار پلاسمون پلاریتون‌های سطحی آن بسیار کم (0/91 دسی‌بل بر میکرومتر) است. ایده اصلی این پژوهش به طراحی یک موجبر پلاسمونی با ضریب شایستگی بیش از 951 مربوط می‌شود. با قرارگیری نانو نوار گرافنی بر روی دی اکسید سیلیکون و تنظیم پتانسیل شیمیایی گرافن، محصورشدگی خوبی برای پلاسمون‌ها ایجاد می‌شود که با اعمال پتانسیل شیمیایی 0/5 الکترون ولت می‌توانند با تلفات بسیار کمی در کانال پلاسمونی انتشار یابند. نسبت تمایز بیش از 45 دسی‌بل نشان می‌دهد که رمزگشای پیشنهادی در تفکیک سطوح یک و صفر منطقی به خوبی عمل می‌کند.

در ادامه، ابتدا به معرفی پارامترهای ساختاری افزاره پیشنهادی پرداخته می‌شود سپس هر یک از حالت‌های کاری افزاره شبیه‌سازی شده و در خصوص آن بحث خواهد شد. پس از مقایسه ساختار پیشنهادی با سایر پژوهش‌های مشابه و نشان دادن ویژگی‌های شاخص طرح ارائه شده، به بحث و نتیجه‌گیری نهایی پرداخته می‌شود.

- 1 Photonic crystal
- 2 Mach-Zehnder
- 3 Surface Plasmon Polaritons (SPPs)
- 4 Decoders
- 5 Flip-Flops
- 6 Multiplexers/Demultiplexers
- 7 Chemical Potential
- 8 Goswami

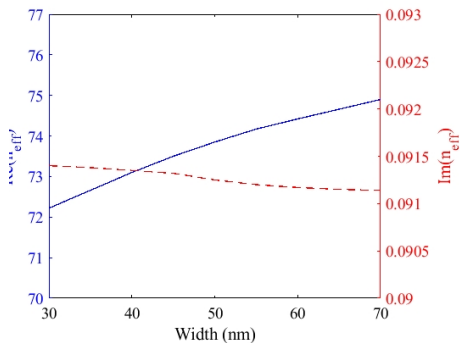
9 Contrast Ratio (CR)

10 Mondal

ضریب شکست موثر⁴ کانال (n_{eff}) است که در هدایت پلاسمون‌های سطحی تاثیرگذار است. ضریب شکست موثر کانال از دو بخش حقیقی و موهومی تشکیل شده است که بخش حقیقی ضریب شکست ($\text{Re}(n_{\text{eff}})$) به محصور شدن امواج در کانال مرتبط است و هر چه مقدار آن در مقایسه با نواحی کناری بیشتر باشد محصورشدگی بیشتر امواج تراهرتز در کانال رخ خواهد داد. بخش موهومی ضریب شکست ($\text{Im}(n_{\text{eff}})$) نیز بیانگر تلفات کانال (α) است و هر چه مقدار آن کمتر باشد مطلوب‌تر است. تلفات کانال با رابطه (2) بیان می‌شود که در این رابطه، c سرعت نور در خلاء است [15].

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

از عوامل موثر بر بخش‌های حقیقی و موهومی ضریب شکست می‌توان به پارامترهای ساختاری افزاره مانند عرض کانال اشاره کرد. همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است به ازای تغییرات عرض نوار گرافن از 30 تا 70 نانومتر، بخش حقیقی ضریب شکست برای مود پایه از 72/22 تا 74/91 و بخش موهومی ضریب شکست از 0/0914 تا 0/0911 تغییر می‌کند.



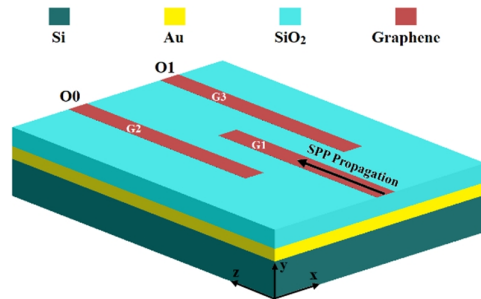
شکل 2. بخش‌های حقیقی و موهومی ضریب شکست

موثر کانال پلاسمونی برحسب عرض نوار گرافنی.

مشاهده می‌شود که به ازای عرض کانال بزرگ‌تر، بخش حقیقی ضریب شکست افزایش و بخش موهومی که پارامتری نامطلوب است کاهش می‌یابد. از آنجایی که افزایش عرض نوار به محصورشدگی بهتر پلاسمون‌ها و کاهش تلفات می‌انجامد به کارگیری عرض زیاد نوار به عنوان یک گزینه اصلی مطرح می‌شود. از طرفی با کوچک شدن عرض نوار، سطح مقطع افزاره کوچکتر می‌شود که برای مجتمع‌سازی افزاره مناسب به نظر می‌رسد. برای این که از ویژگی‌های محصورشدگی پلاسمون‌ها و کوچک‌سازی افزاره استفاده کرد می‌توان بین این موضوع مصالحه کرد. با توجه به این که تغییرات بخش

رمزگشای پلاسمونی مبتنی بر گرافن

رمزگشای پیشنهادی همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است دارای یک بستر سیلیکونی با ضخامت 230 نانومتر است. سپس یک لایه طلا به ضخامت 150 نانومتر بر روی بستر قرار داده شده است که به عنوان یک اتصال برای اعمال اختلاف پتانسیل به نوارهای گرافن استفاده خواهد شد. در ادامه، یک لایه SiO_2 با ضخامت 200 نانومتر بر روی لایه طلا قرار خواهد گرفت سپس روی آن سه نوار گرافنی مطابق شکل 1 قرار داده شده است.



شکل 1. نمای سه بعدی از رمزگشای مبتنی بر گرافن که

پلاسمون‌های سطحی در راستای محور z منتشر می‌شوند.

با توجه به اختلاف پتانسیل اعمالی بین نوارهای گرافن و طلا، پتانسیل شیمیایی گرافن تعیین می‌شود. به دلیل تفاوت ضریب شکست بین نوارهای گرافنی و لایه دی اکسید سیلیکون زیر آن‌ها، پلاسمون پلاریتون‌های سطحی در نزدیکی نوارهای گرافنی محصور¹ می‌شوند و در راستای محور z منتشر می‌شوند. در واقع، در زیر نوارهای گرافنی یک کانال پلاسمونی به وجود می‌آید که SPPها در آن محصور می‌شوند و با اعمال پتانسیل شیمیایی مناسب به سمت درگاه‌های خروجی O0 و O1 انتقال می‌یابند. بر اساس رابطه (1)، با اعمال ولتاژ به نوار گرافن می‌توان پتانسیل شیمیایی آن را کنترل کرد و بر ویژگی‌های مختلف آن مانند رسانایی الکتریکی، ضریب شکست موثر و تلفات انتشار پلاسمون‌های سطحی تاثیر گذاشت [8].

$$\mu_c(V) = h\nu_F \left[\frac{2.25 \times 10^{16} (V_b - 0.8)}{\pi} \right]^{0.5} \quad (1)$$

در این رابطه، h ثابت پلانک²، V_b ولتاژ بایاس و ν_F سرعت فرمی³ گرافن است.

یکی از پارامترهای مهم در طراحی ساختارهای پلاسمونی،

1 Confine

2 Planck

3 Fermi

4 Effective Refractive Index

شبیه‌سازی و بحث

برای شبیه‌سازی افزاره از روش تفاضل محدود حوزه زمان¹ (FDTD) در نرم‌افزار تجاری لومبریکال² استفاده شده است. در این روش، بر اساس شرط کورانت³ مکان و زمان گسسته‌سازی می‌شود و مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی در سه بعد و برحسب زمان محاسبه می‌شوند. سلول مکانی 0/1 نانومتر و گام زمانی برابر 2/5 آتوثانیه در نظر گرفته شده است. از لایه تطبیق کامل⁴ (PML) در اطراف ساختار برای حذف بازتاب‌های مزاحم استفاده شده است.

با توجه به این که ساختار پیشنهادی، یک درگاه ورودی و دو درگاه خروجی دارد دو حالت کاری برای آن در نظر گرفته می‌شود. روش کار رمزگشا به این صورت است که به ازای کنترل ورودی الکتریکی یا همان پتانسیل شیمیایی، فقط یکی از خروجی‌ها فعال است. به عبارت دیگر، به ازای نور منتشر شده در موجبر اصلی، یکی از موجبرهای مجاور می‌تواند پلاسمون‌ها را به سمت درگاه خروجی هدایت کند. تحلیل و شبیه‌سازی حالت‌های کاری رمزگشا به شرح زیر است:

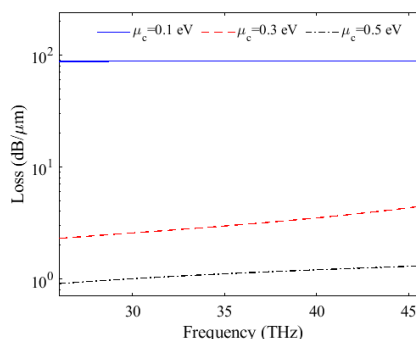
الف) اگر پتانسیل شیمیایی نوارهای گرافنی G2 و G3 به ترتیب برابر 0/5 و 0/1 الکترون ولت باشد محصورشدگی قوی و انتشار نور در زیر نوار G2 رخ می‌دهد زیرا طبق قضیه پائولی⁵ تعداد کمی از پلاسمون پلاریتون‌های سطحی جذب شده و تلفات بسیار کم است در حالی که تلفات در زیر نوار G3 بسیار زیاد است. در نتیجه نور ورودی به درگاه خروجی O0 هدایت می‌شود (شکل 4- الف).

ب) در حالتی که پتانسیل شیمیایی نوارهای گرافنی G2 و G3 به ترتیب برابر 0/1 و 0/5 الکترون ولت باشد در کانال زیر نوار G3 تلفات بسیار کم است. در این حالت، تلفات زیر نوار G2 مقدار زیادی دارد. در نتیجه، نور به درگاه خروجی O1 هدایت شده و این درگاه فعال می‌شود (شکل 4- ب). مشاهده می‌شود که ساختار پیشنهادی عمل رمزگشایی را به درستی انجام می‌دهد.

در شکل 4، توزیع میدان الکتریکی در صفحه xz نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای اعمال ولتاژ مناسب به نوارهای گرافنی، در زیر آنها محصور شدن قوی نور رخ می‌دهد که به عنوان کانال پلاسمونی عمل می‌کنند و امکان کنترل و هدایت امواج نوری را فراهم می‌سازند. شکل 4- الف

موهومی ضریب شکست از عرض‌های بزرگ‌تر از 50 نانومتر تغییرات اندکی دارد می‌توان این مقدار را برای عرض نوار انتخاب کرد. باید در نظر داشت که با کوچک‌تر شدن عرض نوار، تلفات لبه‌ای آن افزایش می‌یابد.

در طراحی ساختارهای پلاسمونی، بسامد کاری افزاره (ω) و پتانسیل شیمیایی گرافن از پارامترهای مهمی هستند که باید اثر آنها بر انتشار پلاسمون‌های سطحی را بررسی کرد. در شکل 3 تلفات انتشار کانال به ازای تغییر بسامد و سه مقدار پتانسیل شیمیایی گرافن نشان داده شده است.



شکل 3. تلفات انتشاری مود پایه در کانال برحسب بسامدهای مختلف و به ازای پتانسیل شیمیایی 0/1، 0/3 و 0/5 الکترون ولت.

مشاهده می‌شود به ازای تغییر بسامد از 26 تا 46 تراهرتز، تلفات ساختار به ازای 3 پتانسیل شیمیایی 0/1، 0/3 و 0/5 الکترون ولت به ترتیب از 87/49 تا 88/23، 2/29 تا 4/52 و 0/91 تا 1/31 دسی‌بل بر میکرومتر تغییر می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که به ازای مقادیر بیشتر پتانسیل شیمیایی، تلفات ساختار کاهش می‌یابد. پتانسیل شیمیایی معادلی برای 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 ساختار که شامل تلفات جذبی گرافن می‌شود با افزایش پتانسیل شیمیایی کمتر می‌شود. به عبارتی با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن می‌توان توان دریافتی در درگاه خروجی را به دلخواه تنظیم کرد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده در این بخش، به نظر می‌رسد بتوان بر اساس کنترل‌پذیری گذردهی کانال پلاسمونی طراحی شده، یک ساختار رمزگشا را پیشنهاد داد. این افزاره بر اساس کلیدزنی ناشی از تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن کار می‌کند که شبیه‌سازی آن در بخش بعد، ارائه می‌شود.

1 Finite Difference Time Domain (FDTD)

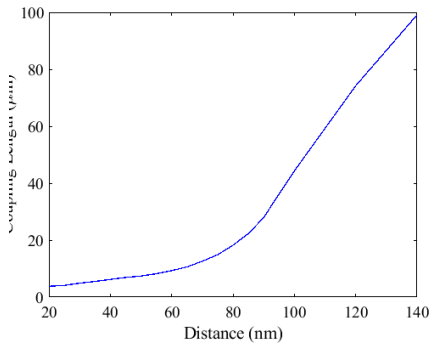
2 Lumerical

3 Currant

4 Perfectly Matched Layer (PML)

5 Pauli

به طول مورد نیاز برای تزویج کامل نور از یک موجبر به موجبر مجاور، طول تزویج گفته می‌شود. هرچه فاصله دو موجبر از یکدیگر بیشتر باشد طول تزویج بیشتر می‌شود. افزایش طول تزویج به منزله کاهش هم‌شنوایی است چون زمانی که دو موجبر از هم دور هستند نفوذ مولفه جانبی میدان الکتریکی یا نشتی نتوان از یکی به دیگری بسیار کم است در نتیجه برای تزویج کامل به طول بلندتری نیاز است. در شکل 5، تغییرات طول تزویج برحسب فاصله بین دو کانال مجاور با عرض نوار 50 نانومتر، پتانسیل شیمیایی 0/5 الکترون ولت و فرکانس 40 تراهرتز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای فاصله بین دو کانال از 20 تا 140 نانومتر، طول تزویج از 3/8 تا 99/1 میکرومتر تغییر می‌کند. به عبارتی هر چه فاصله دو کانال از هم بیشتر شود اندازه طول تزویج به صورت نمایی افزایش می‌یابد.



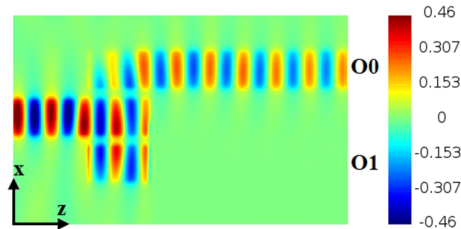
شکل 5. طول تزویج کانال پلاسمونی به ازای فاصله‌های مختلف بین دو کانال مشابه.

ضریب شایستگی² (FOM) به عنوان نسبت بخش حقیقی به بخش موهومی ضریب شکست موثر کانال با رابطه (4) تعریف می‌شود [15]. هر چه مقدار بخش حقیقی ضریب شکست بیشتر باشد محصورسازی نور قوی‌تر خواهد بود. از طرفی مقدار کمتر بخش موهومی ضریب شکست، تلفات گذردهی کمتر را نتیجه می‌دهد. بر این اساس، هرچه مقدار FOM بیشتر باشد محصورسازی نور قوی‌تر و تلفات انتشار کمتر است و عملکرد مطلوب افزاره را نتیجه می‌دهد.

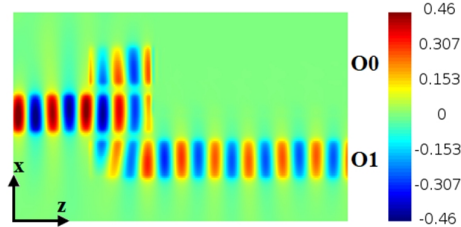
$$FOM = \frac{\text{Re}(n_{\text{eff}})}{\text{Im}(n_{\text{eff}})} \quad (4)$$

با توجه به شکل 2، بخش حقیقی و موهومی ضریب شکست به ازای فرکانس 40 تراهرتز به ترتیب برابر 73/1 و 0/0913 است. بر اساس رابطه (4) می‌توان گفت که ضریب شایستگی کانال در فرکانس کاری 40 تراهرتز برابر 975/43 است که مقدار مناسبی است.

نشان می‌دهد پلاسمون‌های سطحی با اعمال پتانسیل شیمیایی 0/5 الکترون ولت اجازه می‌یابند در موجبر میانی (موجبر ورودی) منتشر شوند و با توجه به پتانسیل شیمیایی 0/5 الکترون ولت برای موجبر بالایی، پلاسمون‌ها می‌توانند به این موجبر تزویج شوند و به سمت درگاه خروجی O0 حرکت کنند. در این حالت، پتانسیل شیمیایی موجبر پایینی برابر 0/1 الکترون ولت است که به دلیل تلفات زیاد پلاسمون‌ها، نوری به درگاه O1 نمی‌رسد. شکل 4-ب به ازای پتانسیل شیمیایی 0/1 الکترون ولت برای موجبر بالا و 0/5 الکترون ولت برای موجبر پایین رسم شده است. برخلاف حالت قبل، پلاسمون‌های رسیده به انتهای موجبر ورودی از طریق تزویج به موجبر پایین به درگاه O1 می‌رسند. بر اساس رابطه (1)، با اعمال ولتاژ بایاس 1/5 و 8/3 ولت به نوار گرافنی می‌توان پتانسیل شیمیایی 0/1 و 0/5 الکترون ولت را به دست آورد.



(الف)



(ب)

شکل 4. توزیع میدان الکتریکی در افزاره به ازای الف) پتانسیل شیمیایی 0/5 الکترون ولت به موجبر بالا و 0/1 الکترون ولت به موجبر پایین، ب) پتانسیل شیمیایی 0/1 الکترون ولت به موجبر بالا و 0/5 الکترون ولت به موجبر پایین.

برای این که بتوان عملکرد ساختار طراحی شده را به عنوان یک رمزگشا پذیرفت باید ارزیابی‌های بیشتری را انجام داد. طول تزویج (L_c) از پارامترهای مهم افزاره‌های پلاسمونی مبتنی بر موجبر است که با رابطه (3) بیان می‌شود. جایی که $\Delta\beta$ برابر با $(\beta_s - \beta_a)/2$ است و β_s و β_a ثابت‌های انتشار¹ متقارن و غیر متقارن هستند [9].

$$L_c = \frac{\pi}{2\Delta\beta} \quad (3)$$

اتصال طبقه‌های مختلف مدارهای نوری به کار می‌آید و باعث می‌شود بتوان طبقه‌های بیشتری را به هم ارتباط داد. همچنین طول تزویج بزرگ کانال باعث می‌شود هم‌شنوایی افزاره مقدار ناچیزی داشته باشد. بطور کلی می‌توان اندازه کوچک، نسبت تمایز بالا و هم‌شنوایی کم را به عنوان ویژگی‌های ممتاز طرح پیشنهادی برشمرد. به نظر می‌رسد بر اساس نتایج به دست آمده، طرح ارائه شده توانسته است باعث بهبود عملکرد رمزگشای نوری شود و یک ریزساختار پایه را برای افزاره‌های پیچیده‌تر پیشنهاد دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رمزگشای نوری پایه برای انتشار پلاسمون پلاریتون‌های سطحی ارائه شده است که نسبت تمایز سطوح منطقی یک و صفر آن 45/73 دسی‌بل است. ایده اصلی ساختار مبتنی بر یک موجبر پلاسمونی است که در آن نانو نوار گرافنی بر روی لایه‌ای از دی اکسید سیلیکون قرار دارد. با اعمال ولتاژهای 1/5 و 8/3 ولت به نانو نوار می‌توان پتانسیل شیمیایی 0/1 و 0/5 ولت را به دست آورد و میزان گذر پلاسمون‌های سطحی را کنترل کرد. طول تزویج 99/1 نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی هم‌شنوایی کمی دارد. اندازه ساختار برابر 1/92 میکرومتر مربع است که برای مدارهای نوری فشرده مناسب است. ضریب شایستگی بیش از 975 یکی دیگر از مزیت‌های رمزگشای پیشنهادی است که کیفیت محصورشدگی پلاسمون‌ها همراه با انتشار کم تلفات آنها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده در این مقاله، می‌توان گفت که افزاره طراحی شده، یک ریزساختار پایه و کارا برای رمزگشاهای پیچیده‌تر است.

تقدیر و تشکر

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

نسبت تمایز (CR) یکی از پارامترهای اساسی در ارزیابی عملکرد افزاره‌های دیجیتالی است و تمایز بین سطح منطقی صفر و یک را نشان می‌دهد. این نسبت در رابطه (5) تعریف شده است [16].

$$CR = 10 \log \left(\frac{L_1}{L_0} \right) \quad (5)$$

در این رابطه، L_0 و L_1 به ترتیب مرز سطوح منطقی 1 و 0 هستند. L_1 کمترین توان مربوط به سطح 1 و L_0 بیشترین توان مربوط به سطح 0 است. از آنجایی که مطابق شکل 4، تلفات انتشار پلاسمون‌ها با اعمال پتانسیل شیمیایی 0/1 الکترون ولت به گرافن بسیار زیاد است عملاً توان ناچیزی به درگاه O1 در حالت (الف) و درگاه O0 در حالت (ب) می‌رسد. در نتیجه، مقدار ضریب تمایز ساختار بسیار زیاد و برابر 45/73 دسی‌بل است.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد افزاره پیشنهادی، نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مشابه، در جدول 1 مقایسه شده است. در این جدول، پارامترهای مهم افزاره‌های نوری از جمله مساحت، نسبت تمایز، ضریب شایستگی و طول تزویج بررسی شده است.

جدول 1. مقایسه نتایج مربوط به ساختار پیشنهادی با پژوهش‌های پیشین.

مرجع	ساختار	مساحت (μm^2)	CR (dB)	FOM	L_c (dB)
[13]	بلور فوتونی	215	10	-	-
[14]	بلور فوتونی	234	11/3	-	-
[15]	پلاسمونی	2/1	36/43	950/92	214/2
این پژوهش	پلاسمونی	1/92	45/73	975/43	99/1

همان‌طور که در جدول 1 نشان داده شده است، ساختار پیشنهادی در این پژوهش نسبت به پژوهش‌های مشابه [13] تا [15]، دارای مساحت کمتری است که این موضوع در فرآیند مجتمع‌سازی افزاره‌های نوری یک ویژگی مهم محسوب می‌شود. اندازه نسبت تمایز که نشان دهنده عملکرد موفق افزاره در تفکیک منطق‌های 0 و 1 است در این پژوهش، نسبت به پژوهش‌های دیگر [13] تا [15] بیشتر است. این ویژگی در

References

- [1] M. J. Maleki, M. Soroosh, F. Parandin, F. Haddadan, Photonic Crystal-Based Decoders: Ideas and Structures.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [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) 818.

- [5] M. J. Maleki, M. Soroosh, An ultra-fast all-optical 2-to-1 digital multiplexer based on photonic crystal ring resonators, *Opt Quant Electron* 54 (2022) 397.
- [6] M. J. Maleki, M. Soroosh, A. Mir, Improving the performance of 2-to-4 optical decoders based on photonic crystal structures, *Crystals* 29 (2019) 635.
- [7] L. Jiang, Q. Huang, K. S. Chiang, Low-power all-optical switch based on a graphene-buried polymer waveguide Mach-Zehnder interferometer, *Optics Express* 30 (2022) 6786-97.
- [8] M. J. Maleki, M. Soroosh, A low-loss subwavelength plasmonic waveguide for surface plasmon polariton transmission in optical circuits, *Opt Quant Electron* 55 (2023) 1266.
- [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] F. Bagheri, M. Soroosh, Design and simulation of compact graphene-based plasmonic flip-flop using a resonant ring, *Diamond and Related Materials*, 136 (2023) 109904.
- [11] M. Mohammadi, M. Soroosh, A. Farmani, S. Ajabi, Engineered FWHM enhancement in plasmonic nano resonators for multiplexer/demultiplexer in visible and NIR range, *Optik* 274 (2023) 170583.
- [12] M. Soroosh, A. Farmani, M. J. Maleki, F. Haddadan, M. Mansouri, Highly Efficient Graphene-Based Optical Components for Networking Applications. In *Photonic Crystal and Its Applications for Next Generation Systems*, Singapore, Springer Nature Singapore (2023) 15-35.
- [13] K. Goswami, H. Mondal, S. Dutta, Design and analysis of 1: 2 line optical decoder based on linear optics. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 9 (2023) 100190.
- [14] H. Mondal, M. Sen, K. Goswami, Design and analysis of all-optical 1-to-2 line decoder based on linear photonic crystal. *IET Optoelectronics* 13 (2019) 191-195.
- [15] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, A subwavelength graphene surface plasmon polariton-based decoder, *Diamond and Related Materials* 134 (2023) 109780.
- [16] M. J. Maleki, A. Mir, M. Soroosh, Design and analysis of a new compact all-optical full-adder based on photonic crystals, *Optik* 227 (2021) 166107.