



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۵۴۲-۱۰-A

طراحی و شبیه سازی مدولاتور ماخ-زندری مبتنی بر پلاسمونیک

فرزاد باطومچی ، کامبیز عابدی

دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

farzad.batoomchi@gmail.com, k_abedi@sbu.ac.ir

چکیده- در این مقاله با استفاده از روش تفاضل محدود، مدولاتور ماخ-زندری مبتنی بر فوتونیک سیلیکونی که از طلا به عنوان کاتد و آند بازوهای مدولاتور ماخ-زندری استفاده شده، طراحی و شبیه سازی شده است. افزایش جذب، کاهش تلفات الحاقی و ولتاژ بایاس ساختار ماخ-زندری برای همسویی با سیستم های CMOS امری بسیار مهم در طراحی چنین افزاره هایی می باشد. در این مقاله با استفاده از جذب بالای پلاسمونیک طلا، تلفات الحاقی افزاره شبیه سازی شده تا ۱.۲۶ دسی بل بر سانتی متر به ازای ولتاژ بایاس معکوس ۰.۵ ولت کاهش یافته است. طیف انتقال و جذب مدهای ساختار در اطراف طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر و تغییر فاز خروجی از ۰.۰۶۱۴- تا ۰.۱۷۰۱ رادیان نسبت به تغییر ولتاژ بایاس معکوس اعمالی که منجر به مدولاسیون فاز می شود، نیز نشان داده شده است.

کلید واژه- پلاسمونیک، سیلیکون فوتونیک، مدولاسیون الکترواپتیکی، مدولاتور ماخ-زندری، ولتاژ بایاس کم

Design and analysis of Mach-Zehnder modulator based-on plasmonic

Farzad Batoomchi, Kambiz Abedi

SBU University, Tehran, Iran, farzad.batoomchi@gmail.com, k_abedi@sbu.ac.ir

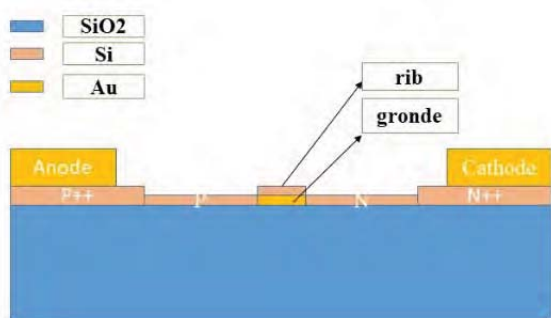
Abstract- In this paper, using the Finite Difference Eigenmode, the Mach-Zehnder modulator based on silicon photonics, which uses gold as the cathode and anode of the Mach-Zehnder modulator arms, is designed and simulated. Increasing absorption, reducing additional losses and bias voltage Mach Zehnder structure is very important for compatibility with CMOS processes in the design of such devices. In this paper, using the high plasmonic absorption of gold, the simulated add-on losses are reduced to 1.26 dB / cm by 0.5 V reverse bias voltage. The spectra of transmission and absorption of structure modes around the telecommunication wavelength of 1550 nm and the change of the output phase from -0.0614 to 0.1701 radians with respect to the change of reverse bias voltage of the actions leading to phase modulation are also shown.

Keywords: Electro-optical modulation, Low Starter Voltage, Mach-Zehnder Modulator, Plasmonic, Silicon Photonics

برای مدولاسیون و طول افزاره مورد نظر ارتباط دارد. هر چه میزان مدهای جذب شده به ازای ولتاژهای بایاس اعمالی بیشتر باشد، مدولاسیون دامنه و فرکانس بیشتری علاوه بر مدولاسیون فاز به دست می‌آید. برای کاهش تلفات الحاقی و افزایش جذب می‌توان از خاصیت مختلف موادی مانند پلاسمونیک فلزات، گرافن [6] و مواد تصنعی ساخت انسان مانند فراماده که همه‌ی این‌ها پهنای باند وسیعی برای جذب نور ایجاد می‌کنند، می‌توان استفاده کرد. در این مقاله، مدولاتور ماخ-زندری مبتنی بر پلاسمونیک طلا ارائه شده است که هدف آن، استفاده از خاصیت جذب پلاسمونیک طلا، برای کاهش تلفات الحاقی، افزایش تعداد مدهای جذب شده برای مدولاسیون دامنه و بازه‌ی تغییرات فاز نسبی خروجی که منجر به مدولاسیون فاز می‌شود، می‌باشد.

طراحی افزاره و روش شبیه سازی

در شکل ۱ ساختار مدولاتور ماخ-زندری نشان داده شده



است.

شکل ۱: ساختار مدولاتور ماخ-زندری

این ساختار از یک موجبر سیلیکونی به طول ۵ میلی متر که توسط یک لایه طلا پوشیده شده، تشکیل شده است. مدولاتورهای ماخ-زندری pn با تزریق بار به منطقه نیمه ذاتی (غلظت کم) در موجبر، باعث تغییر در ضریب شکست می‌شوند. در واقع یک اتصال pn از تزریق حامل‌ها

مقدمه

سیستم‌های مخابراتی از آشکارسازهای همدوس و مدولاسیون‌های پیشرفته استفاده می‌کنند که اطلاعات را بر روی دامنه و فاز سیگنال‌های نوری رمزگذاری می‌کنند [1]. مدولاسیون الکترواپتیکی به دو گروه عمده، یعنی مدولاسیون فاز و مدولاسیون جذب تقسیم می‌شوند که بر اساس تغییر میدان الکتریکی که باعث تغییر در قسمت حقیقی یا موهومی ضریب شکست (n) ماده فعال می‌شود، عمل می‌کند [2]. در مدولاسیون فاز، تغییرات ضریب شکست باعث تغییر در جذب مواد می‌شود. این تغییرات بر اساس روابط کرامر-کرونیک^۱ به دست می‌آید که متناظر با ضریب موثر K است [3]. مدولاتورهای فاز برای مدوله کردن دامنه به نوعی از طرح تداخل‌سنجی مانند ساختار ماخ-زندری نیاز دارند. عملکرد یک ماخ-زندری به شدت وابسته به مکانیسم‌های مدولاسیون فیزیکی اساسی، مانند اثر پاکلز و کر بر پایه میدان الکتریکی، اثر تحدید کوانتومی و مدولاسیون حامل آزاد است که در سیلیکون (Si) و فلزاتی مانند طلا (Au) وجود دارد و در آن‌ها تنظیم ضریب شکست توسط مدل درود^۲ وابسته به غلظت حامل‌ها (یعنی مدولاسیون حامل آزاد) انجام می‌شود [4]. دستیابی به مدولاسیون در مدولاتورهای ماخ-زندری با مقادیر ولتاژ بایاس زیر ۱ ولت مطلوب است، زیرا این امر مستقیماً با ولتاژ ترانزیستورهای کار شده در سیستم‌های CMOS جدید، همسویی دارد [5]. کاهش تلفات الحاقی به میزان غلظت حامل‌های آزاد، جذب ماده فعال

۱-Kramers-Kronig

۲-Drude

آن کاهش می‌یابد و منجر به مدولاسیون دامنه می‌شود. در انتهای این بخش برای شبیه‌سازی این ساختار از نرم‌افزار Lumerical و از روش تفاضل محدود (FDE) و با استفاده از ماژول‌های Mode, Device, Interconnect استفاده شده است.

نتایج و شبیه‌سازی ها

برای درک بهتر نمودارها برخی از روابط در ادامه آورده شده است. تغییرات ضریب شکست (Δn) در اثر اعمال میدان الکتریکی برابر است با :

$$\Delta n = \frac{7}{2} \left(\frac{n_0^3}{2} \right) r E$$

غلظت برای ناحیه n 10^{17}Cm^{-3} و غلظت برای ناحیه p به طرفین 10^{17}Cm^{-3}

که r ضریب الکترواپتیک و E میدان الکتریکی است. تغییرات فاز در مقابل میدان الکتریکی اعمالی با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta n) L$$

غلظت برای ناحیه n 10^{17}Cm^{-3} و غلظت برای ناحیه p به طرفین 10^{17}Cm^{-3}

که در رابطه‌ی λ طول موج و L طول افزاره می‌باشد. چنانچه اختلاف ولتاژ بین الکترودها را با V و فاصله‌ی بین آن‌ها را با d نشان دهیم، در این صورت میدان به طور تقریبی v/d می‌شود و می‌توان نوشت:

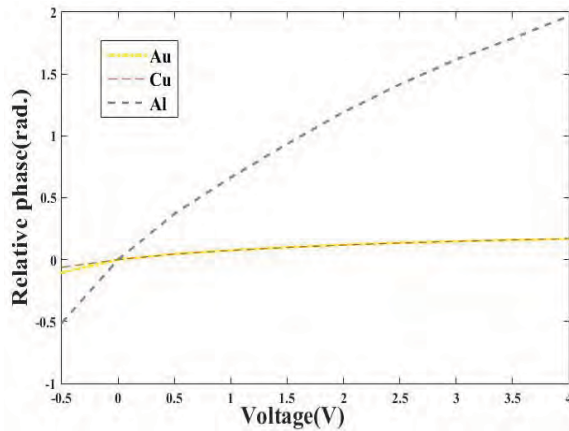
$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\left(\frac{n_0^3}{2} \right) \frac{V}{d} \right] L$$

غلظت برای ناحیه n 10^{17}Cm^{-3} و غلظت برای ناحیه p به طرفین 10^{17}Cm^{-3}

بنابراین، زمانی که هیچ ولتاژی به الکترودها اعمال نشود، $\Delta \varphi$ صفر باقی می‌ماند، و اگر ولتاژ اعمال شود، این اختلاف با π تعیین می‌شود. این ولتاژ به عنوان V_{π} شناخته می‌شود و برابر است با :

به ورقه نازک (Slab) موجبر سیلیکونی ایجاد شده و غلظت حامل‌های نوع n (بخشنده) به یک طرف افزاره و غلظت حامل‌های نوع p (پذیرنده) به طرف دیگر اعمال و منجر به شکل‌گیری پتانسیل داخلی در محل اتصال می‌شوند. در شکل ۱ از سیلیکا (SiO_2) به عنوان بستر برای شبیه‌سازی مواد استفاده شده است. سیلیکا به عنوان بستری دی الکتریکی برای موجبر سیلیکونی روی مفره شبیه‌سازی شده، استفاده می‌شود. همچنین ضخامت لایه بستر ۲ میکرومتر است. ۹۰ نانومتر سیلیکون به عنوان ورقه نازک بر روی بستر قرار گرفته و مقدار $5 \times 10^{17} \text{Cm}^{-3}$ غلظت برای ناحیه n و 10^{17}Cm^{-3} غلظت برای ناحیه p به طرفین موجبر سیلیکونی مرکزی تزریق می‌شوند. ناخالصی‌های $P + +$ و $n + +$ برای اتصال (کوپلینگ) قوی‌تر مد (حالت) فوتونیک موجبر سیلیکونی و مد پلاسمونیک به بازوهای سازه تزریق می‌شوند. از طرف دیگر 500nm نانومتر لایه طلا روی هر دو بازو به عنوان الکترودها اتصال به زمین در پشته فلزی- اکسید نیمه هادی (MOS)، برای مدولاسیون دامنه در هر دو بازو و عدم تغییر ضریب شکست به مرور زمان براساس خاصیت اکسید نشدن طلا، اعمال شده است. هم چنین از ساختار تیغه‌ای (rib) به ضخامت 130nm نانومتر به عنوان موجبر سیلیکونی برای مدولاسیون فاز نور اعمال شده استفاده شده است. عملکرد این مدولاسیون در این صورت است که فوتون‌ها در هنگام عبور از موجبر تیغه‌ای در اثر اعمال میدان الکتریکی و بازترکیب حامل‌های تزریق شده در اتصال pn و گسیل القایی آن‌ها دچار تغییر حرکت و در نتیجه تغییر فاز و مدولاسیون فاز می‌شود، به عبارت دیگر تغییر ناخالصی منجر به تغییر ضریب شکست و تغییر ضریب شکست باعث تغییرات فاز می‌شود. الکترودها بر روی بازوهای ماخ-زندر نیز در اثر اعمال میدان علاوه تغییر فاز به علت جذب پلاسمونیک فلز کار شده مانند خازن عمل کرده در نتیجه توان فوتون و دامنه

مراتب کمتر از آلومینیوم با ۵.۳ دسی بل بر سانتی متر [5] و مس ۱.۳۵ دسی بل بر سانتی متر در ولتاژ مشخص ۰.۵ ولت است. توجه داشته باشید لایه‌ی نوع n مستقیماً به خطوط زیر لایه متصل است، بنابراین ولتاژ مثبت منجر به بایاس معکوس می‌شود.



نمودار ۲: تغییرات فاز نسبی خروجی نسبت به ولتاژهای بایاس اعمالی

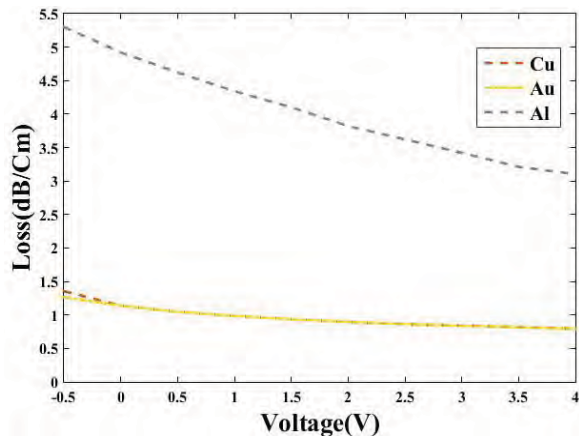
نمودار ۲ تغییر فاز به عنوان تابعی از ولتاژ برای مدولاتور ماخ-زندر را نشان می‌دهد، و بیان کننده‌ی این است که به ازای تغییرات ولتاژ از ۰.۵ تا ۴ ولت، فاز خروجی از ۰.۶۱۴ تا ۰.۱۷۰ رادیان مدوله می‌شود. باتوجه به نمودار ۲ طلا به عنوان ماده فعال مدوله شده به دلیل تغییرات ضریب شکست موهومی کمتر در مقایسه با سایر فلزات مانند آلومینیوم تغییرات فازی کمتری داشته در نتیجه از مدولاسیون فازی نامطلوب‌تری برخوردار است. نمودار ۳ طیف انتقال نور عبوری افزاره برای طول موجهای مختلف را نشان می‌دهد. نمودار ۳ گویای این است که افزاره شبیه‌سازی شده در ۲ مد با طول موجهای نوری مختلف دارای جذب می‌باشد و به ازای این مدها خروجی دارای مدولاسیون دامنه می‌باشد. همچنین بیشترین جذب مربوط به حالتی است که به افزاره ولتاژی اعمال نشده باشد. علاوه بر این تغییر ولتاژ بایاس باعث تغییر در طول

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{n^3} \frac{1}{r_{33}}$$

تلفات الحاقی نسبت ماکزیمم انتقال نور عبوری نرمال شده به انتقال ایده آل است و برابر با:

$$IL = -10L$$

که در معادله $T(\delta)$ از نمودار طیف انتقال به دست می‌آید. براساس شبیه‌سازی به دست آمده، میزان تلفاتی که براساس جذب ساختار پلاسمونیک به ازای ولتاژهای بایاس مختلف اعمال شده را می‌توان در نمودار ۱ مشاهده نمود.



نمودار ۱: تلفات سیستم به ازای ولتاژهای بایاس اعمالی

نمودار ۱ کاهش تلفات تا ۱.۲۶ دسی بل بر سانتی متر به ازای ولتاژ ۰.۵ ولت نشان می‌دهد و دلیل آن نیز این است که اتصال pn در بایاس معکوس قرار دارد. لازم به ذکر است که این تلفات ناشی از تغییر ضریب شکست موهومی موثر مواد می‌باشد [5]. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تلفات الحاقی به دست آمده به

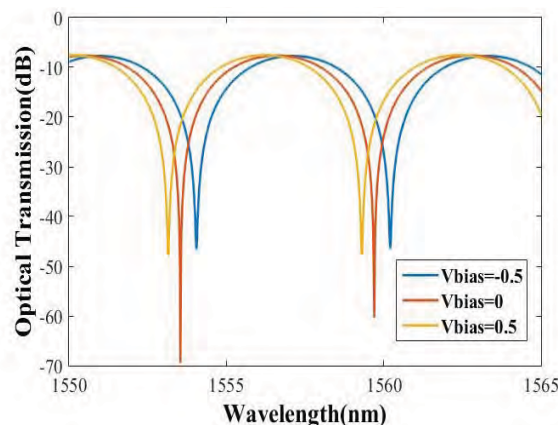
۳-Insertion Loss

رادیان به ازای ولتاژ بایاس مختلف و نحوه‌ی مدولاسیون فاز مورد بررسی قرار گرفت و با سایر فلزات مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه نیز به ازای ولتاژ بایاس مختلف، شیفت فرکانسی و طول موج‌هایی که در آن جذب رخ داده و منجر به مدولاسیون فرکانس و دامنه می‌شود، مشاهده شد.

مرجع‌ها

- [1] R. Amin, C. Suer, Z. Ma, I. Sarpkaya, J. B. Khurgin, R. Agarwal, and V. J. Sorger, "Active material, optical mode and cavity impact on nanoscale electro-optic modulation performance," *Nanophotonics* 7(2), 455–472 (2017).
- [2] R. Amin, C. Suer, Z. Ma, I. Sarpkaya, J. B. Khurgin, R. Agarwal, and V. J. Sorger, "A deterministic guide for material and mode dependence of on-chip electro-optic modulator performance," *Solid-State Electron.* 136, 92–101 (2017).
- [3] R. Amin, J. B. Khurgin, and V. J. Sorger, "Waveguide-based electro-absorption modulator performance: Comparative analysis," *Opt. Express* 26(12), 15445–15470 (2018).
- [4] R. Amin, R. Maiti, C. Carfano, Z. Ma, M. H. Tahersima, Y. Lilach, D. Ratnayake, H. Dalir, and V. J. Sorger, "0.52 V mm ITO-based Mach-Zehnder modulator in silicon photonics," *APL Photonics* 3, 126104 (2018).
- [5] T. Baehr-Jones, R. Ding, Y. Liu, A. Ayazi, T. Pinguet, N. Harris, M. Streshinsky, P. Lee, Y. Zhang, A. Lim, T. Liow, S. Teo, G. Lo, and M. Hochberg, "Ultralow drive voltage silicon traveling-wave modulator," *Opt. Express* 20, 12014-12020 (2012).
- [6] Farmani, Ali & Zarifkar, A. & Sheikhi, Mohammad & Miri, Mehdi. (2017). Design of a tunable graphene plasmonic-on-white graphene switch at infrared range. *Superlattices and Microstructures*. 112.404-404. 10.1016/j.spmi.2017.09.051.

موج و در نتیجه تغییر فرکانس و یا به اصطلاح شیفت فرکانسی می‌شود که خود نشانه دهنده‌ی مدوله شدن فرکانس علاوه بر مدولاسیون دامنه و فاز نیز می‌باشد. شایان ذکر است که فقط یک بازو در هر سه این نمودارها مورد بررسی قرار گرفته است.



نمودار ۳: طیف انتقال نور عبوری به ازای طول موج‌های مختلف طلا نسبت به سایر فلزات مشابه مانند مس و آلومینیوم در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر عمق پوستی بیشتر (۳۱ نانومتر) و طول نفوذ کمتری (۲۴۸ نانومتر) دارد که علاوه بر جذابیت‌های ساخت (ابعاد) برای مدولاسیون دامنه و فرکانس جذابیت بیتر دارد هرچند که تغییرات ناچیز ضریب شکست آن منجر به مدولاسیون فاز کمتری می‌شود، از طرفی طلا اکسید نمی‌شود در نتیجه به مرور زمان تغییراتی در خروجی آن رخ نمی‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختاری ماخ-زندری مبتنی بر پلاسمونیک طلا ارائه شد که در آن تلفات الحاقی به ازای ولتاژ بایاس معکوس ۰.۵- ولت تا ۱.۲۶ دسی بل بر سانتی متر کاهش یافت. همچنین تغییرات فاز از ۰.۶۱۴- تا ۰.۱۷۰- یافت.