

گیت منطقی پلاسمونی دوبعدی OR بر اساس ساختار فلز-عایق-فلز از نانو کاواک تشدیدگر

علیرضا دولت آبادی و نصرت‌الله گرانیپه

دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده - در این مقاله نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد یک گیت منطقی تمام نوری پلاسمونی OR که بر اساس ساختار فلز-عایق-فلز از نانو کاواک تشدیدگر است، ارائه می‌شود. رفتار این گیت منطقی که به روش تفاضل محدود در حوزه زمان شبیه‌سازی شده است، بر اساس تداخل سازنده مدهای تشدید در کاواک موجود در ساختار است. با توجه به ابعاد کوچک و فشرده این گیت منطقی، قابلیت به کارگیری در مدارهای مجتمع نوری را داراست.

کلید واژه- پلاسمونی، تشدیدگر، فلز-عایق-فلز، گیت منطقی، نانو کاواک.

Two Dimensional Plasmonic Logic Gate of OR Based on Nano-cavity Resonator

¹Alireza Dolatabady and ^{2*}Nosrat Granpayeh

K. N. Toosi University of Technology, Faculty of Electrical Engineering

¹alirezadolatabady@ee.kntu.ac.ir, ^{2*}granpayeh@eetd.kntu.ac.ir

Abstract- In this paper, an all-optical plasmonic OR gate is proposed. The gate structure is based on metal-insulator-metal waveguides with nano-cavity resonator. The performance of the gate is simulated via finite difference time domain method. The constructive interference of resonance modes in the nano-cavity, provides the desired operation. Due to the compact size of the structure, it has capability to be utilized in photonic integrated circuits.

Keywords: Logic Gate, Metal-Insulator-Metal, Nano-cavity, Plasmonic, Resonator.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پژوهش‌های متعدد سال‌های اخیر پیرامون ادوات الکترونیک، نشان‌دهنده برخی محدودیت‌ها از جمله سرعت عملکرد پایین و نیز تلفات زیاد سیگنال در آنها بوده است. بسیاری از قطعات مورد استفاده در سامانه‌های مختلف حسگری، ارتباطی، پردازشی، و کنترلی، بر پایه همین ادوات‌اند. بر این اساس، به-کارگیری ادوات نوری در بسیاری از کاربردها جایگزین مناسبی برای ادوات الکترونیک به شمار می‌آید. به‌کارگیری کابل‌های فیبر نوری، به عنوان کانال انتقال داده‌های نوری در سامانه‌های ارتباطی راه دور و نیز شبکه‌های محلی، از سال‌ها پیش قابلیت‌های فراوانی را در به‌کارگیری هر چه بیشتر ادوات نوری فراهم کرده است [۱]. از اساسی‌ترین ملزومات مشاهده شده در سامانه‌های نوری، نیاز به کوچک سازی ابعاد آنها برای تحقق مدارهای مجتمع نوری است. مهم‌ترین عامل محدودکننده طراحان این مدارها، حد پراش نور است که امکان دستیابی به ادوات نوری معمول سیلیکونی در ابعاد زیر طول موج را غیرممکن می‌نماید [۲]. از جمله راه‌کارهای پیشنهادی مناسب برای حل این مشکل، به‌کارگیری ویژگی‌های انتشار امواج پلاسمون سطحی در ساختارهای مبتنی بر رسانا-عایق است [۳]. این امواج، در فصل مشترک سطوح رسانا (از جمله فلزات نجیب) و عایق‌ها تحریک و منتشر، و در راستای عمود بر این فصول مشترک میرا می‌شوند. این امواج، به‌شدت به فصول مشترک یاد شده مقید هستند و امکان هدایت در ابعاد زیر طول موج را فراهم می‌آورند [۱].

گیت‌های منطقی به عنوان جزء پایه ساختارهای پردازش‌گر در سامانه‌های محاسباتی، کنترلی، و نیز مخابراتی، به‌شمار می‌آیند. مطالعاتی بر پایه ایده‌ها و ساختارهای مختلف برای پیاده‌سازی گیت‌های منطقی نوری ارائه شده‌اند که از جمله می‌توان به گیت‌های منطقی بر پایه ویژگی‌های غیرخطی نور اشاره کرد که در آنها با به‌کارگیری میدان‌های بایاس الکتریکی یا مغناطیسی خارجی، اثر غیرخطی نور و در نتیجه عملکرد منطقی مورد نظر تحقق می‌یابد [۴]. ساختارهایی بر اساس آرایش خاص از فوتونیک کریستال‌ها [۵]، مدولاسیون خودفازی در فیبری با ویژگی غیرخطی بالا [۶]، و جذب دوفوتونی در موج‌بر سیمی سیلیسیمی [۷]، از جمله ایده‌های مختلف برای پیاده‌سازی گیت‌های منطقی نوری هستند. همچنین، شبکه‌هایی شامل نانوسیم‌های کربنی، به منظور تحقق عملگرهای منطقی با استفاده از تداخل وابسته به فاز و قطبش پرتوهای منتشر شونده معرفی شده‌اند [۲]. گیت‌های منطقی فشرده مختلفی بر اساس ساختارهای پلاسمونی از جمله گیت منطقی تمام نوری پلاسمونی بر اساس ساختار تشدیدگر دیسک شکل [۸]، و گیت منطقی بر پایه نانوموج‌برهای شکافی Y-شکل متقارن بر لایه

نازکی از طلا نیز بررسی شده‌اند [۹]، که عملکرد آنها بر پایه سازنده یا مخرب بودن تداخل امواج است.

در این مقاله عملگر پایه منطقی OR، بر پایه یک ساختار ساده از نانو کاواک تشدیدگر معرفی می‌شود. این پژوهش، در ادامه بررسی پیشین یک گیت تمام نوری XOR است [۱۰]. ساختار معرفی شده، بر پایه نانوموج‌برهایی از فلز-عایق-فلز شامل کاواک تشدیدگر است که براساس تداخل سازنده امواج ورودی به آن عمل می‌کند. گیت معرفی شده نسبت به مورد مشابه بررسی شده پیشین در [۹]، از طول کوچک‌تری برخوردار است و بنابراین، قابلیت به‌کارگیری در ساختارهای پردازشی-محاسباتی نوری آینده را دارد. در بخش دوم این مقاله، ساختار ارائه شده و ایده تحقق عملگر منطقی مورد نظر معرفی می‌شود. در بخش سوم، نتایج شبیه‌سازی عملکرد آن ارائه می‌شود و در بخش چهارم نیز با بیان نتیجه‌گیری، مقاله خاتمه می‌یابد.

۲- توصیف ساختار معرفی شده و عملکرد آن

شماتیک ساختار برای گیت منطقی معرفی شده در شکل ۱ قابل مشاهده است. این ساختار، بر پایه آرایشی مناسب از دو موج‌بر ورودی و یک موج‌بر خروجی مستطیلی از فلز-عایق-فلز است که یک کاواک تشدیدگر آنها را به هم کوپل می‌کند. این کوپلاژ، تنها در طول موج‌های خاصی که در شرط تشدید کاواک صادق‌اند، صورت می‌گیرد. ساختار مورد نظر که عملکرد منطقی XOR آن پیش‌تر بررسی شده است [۱۰]، الهام بخش از ساختار فیلتر معرفی شده توسط هو و همکارانش است [۳].

آرایش خاص موج‌برهای ورودی و خروجی نشان داده شده در شکل ۱، بیان‌کننده عملگر منطقی OR است. جدول ۱، نمایان‌گر جدول درستی یک گیت منطقی OR است. بر اساس ساختار شکل ۱، دو پایانه، واقع در موج‌برهای عمودی در سمت چپ شکل (بالا و پایین) به عنوان ورودی‌ها، و نیز موج‌بر سمت راست (پایین)، به عنوان خروجی گیت در نظر گرفته شده‌اند. مطابق جدول ۱، برای حالت‌هایی که هر دو و یا تنها یکی از دو ورودی این گیت مقدار داشته باشد (۱ منطقی باشد)، خروجی نیز مقداری غیر صفر خواهد داشت. این سه حالت را می‌توان با اعمال موج با طول موجی برابر با طول موج تشدید کاواک کوپل‌کننده، از هر یک از دو موج‌بر ورودی سمت چپ و یا هر دوی آنها، تحقق بخشید. حالت دیگر، حالتی است که هر دو ورودی گیت مقدار صفر داشته باشند. بدیهی است که در این حالت خروجی نیز صفر خواهد بود.

تحلیل چگونگی ایجاد موج ایستا در ساختاری شبیه شکل ۱، در [۳] به کمک اصول الکترومغناطیس صورت گرفته است. شرایط تشکیل موج ایستا در نانو کاواک تشدیدگر مستطیل شکل موجود در ساختار، به طول کاواک، و ثابت انتشار مد

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- ملاحظات کلی شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد گیت منطقی پیشنهادی، از روش تفاضل محدود در حوزه زمان^۱ دو بعدی استفاده شده است. فضای شبیه‌سازی در حوزه مکان و زمان گسسته شده، معادلات دیفرانسیل ماکسول به معادلات تفاضلی تبدیل شده، و با به‌روز رسانی^۲ مرتب حل این معادلات تفاضلی، حل تمام موج میدان-های الکترومغناطیسی در فضای شبیه‌سازی فراهم شده است. همچنین، به‌کارگیری ابزارهای تبدیل فوریه، نتایج یافت شده در حوزه زمان را به حوزه فرکانس منتقل کرده است. برای ایجاد این روش، فضای شبیه‌سازی به سلول‌هایی با ابعادی برابر با $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ nm}$ انتخاب شده‌اند. شرایط مرزی جاذب در اطراف فضای شبیه‌سازی، با پیاده‌سازی شرایط مرزی CPML^۳ ارضا شده‌اند. الگوریتم FDTD مورد نظر، بدون به‌کارگیری نرم-افزارهای تجاری، و با نوشتن کدی در محیط نرم‌افزار متلب تحقق یافته است.

به منظور عملکرد ساختار مورد نظر در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر، و با به‌کارگیری نتایج تحلیل در [۳]، طول کاواک (L_s) به اندازه ۵۶۵ نانومتر انتخاب شده است. پارامترهای ساختاری دیگر شکل ۱، به صورت $W = W_s = 100 \text{ nm}$ ، $d = 15 \text{ nm}$ و $\Delta L_1 = \Delta L_2 = (L_s - W)/2$ انتخاب شده‌اند.

۳-۲- نتایج شبیه‌سازی

در شکل ۲-الف، طیف انتقال توان ساختار نشان داده می‌شود. برای دو حالتی که تنها یکی از ورودی‌های موج‌برها روشن (۱) منطقی) است، نسبت انتقال توان از ورودی به خروجی ۰/۳۳۵ است که می‌توان به منزله سطح آستانه ۱ منطقی در خروجی تعریف نمود. در حالتی که هر دو ورودی روشن (۱ منطقی) هستند، میزان انتقال توان ۰/۶۷ است که به دلیل تزریق دو موج در کاواک از سوی دو موج‌بر ورودی، میزان انتقال توان، دو برابر حالتی است که تنها از یکی از موج‌برها تزریق موج حاصل شود. بیشینه منحنی‌های یاد شده در طول موج ۱۵۶۸ نانومتر مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۲-ب تا ۲-د پروفایل شدت میدان مغناطیسی در طول موج ۱۵۶۸ نانومتر، و در شکل ۲-ه نیز، ساختار گیت مورد نظر مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

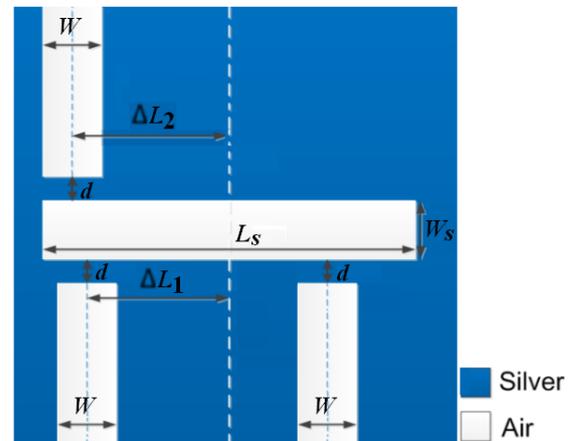
در این مقاله، نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک گیت منطقی OR تمام نوری شامل نانوکاواک تشدیدگر ارائه شده است. می‌توان

منتشر شونده در آن بستگی دارد. با انتخاب مناسب مقادیر ΔL_1 و ΔL_2 می‌توان به ایجاد تداخل سازنده یا مخرب موج در ساختار رسید. اگر در آرایش شکل ۱، $\Delta L_2 = \Delta L_1$ انتخاب شود، می‌توان باعث ایجاد دو مد تداخلی سازنده شد. به کمک این ایده می‌توان به طراحی گیت تمام نوری منطقی مورد نظر دست پیدا کرد که نتایج شبیه‌سازی عملکرد چنین ساختاری با طرح یاد شده، در بخش ۳ خلاصه شده‌اند.

در طرح پیشنهاد شده بر این ساختار مبتنی بر موج‌برهای فلز-عایق-فلز، بخش فلزی نقره، و ماده عایق در نظر گرفته شده، هوا با ضریب گذردهی ۱ فرض شده است. برای توصیف فلز نقره در شبیه‌سازی‌های مورد نظر، از مدل درود استفاده شده است که در آن به فلز نقره، ضریب گذردهی الکتریکی مختلط و وابسته به فرکانسی به صورت زیر نسبت داده می‌شود [۸]:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\gamma\omega} \quad (1)$$

که در آن پارامترهای ϵ_∞ ، ω_p و γ ، به ترتیب بیان‌گر ضریب گذردهی الکتریکی در فرکانس بی‌نهایت، فرکانس پلاسما حجمی، و فرکانس زاویه‌ای میراکننده هستند که برای فلز نقره، به ترتیب برابر با ۳/۷، ۹/۱ eV و ۰/۰۱۸ eV هستند [۸].



شکل ۱: ساختار پیشنهاد شده برای گیت مورد نظر. پارامترهای W ، W_s ، L_s ، d ، ΔL_1 و ΔL_2 ، به ترتیب نمایان‌گر پهناهای موج‌برهای ورودی و خروجی، پهناهای کاواک، طول کاواک، فاصله موج‌برهای ورودی و خروجی از کاواک، و فاصله دو موج‌بر ورودی از محور ساختار (خط نقطه‌چین) هستند.

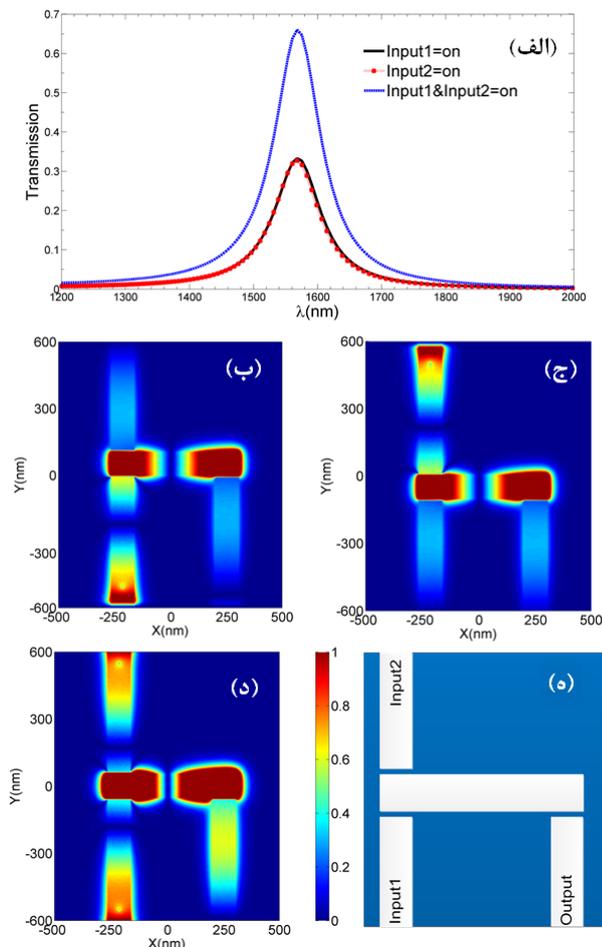
جدول ۱: جدول درستی گیت منطقی OR.

INPUT1	INPUT2	OUTPUT
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

¹ Finite Difference Time Domain: FDTD

² Update

³ Convolutional Perfectly Matched Layers: CPML



شکل ۲: (الف) طیف انتقال توان، پروفایل شدت میدان مغناطیسی عمودی در حالتی که (ب) و (ج) تنها یکی از ورودی‌ها، و (د) هر دو ورودی روشن (۱) هستند، و (ه) ساختار گیت پیشنهادی.

با تغییر پارامترهای ساختاری، عملکرد گیت مورد نظر را برای طول موج خاص طراحی کرد. نتایج شبیه سازی، برآمده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان است. می‌توان با در نظر گرفتن طرح‌های دیگر، سایر عملگرهای منطقی را نیز تحقق بخشید. با وجود ابعاد کم و قابلیت به کارگیری در مدارهای مجتمع نوری، از مهم‌ترین مشکلات پیش رو در برابر چنین ساختارهای پلاسمونی مبتنی بر فلزات می‌توان به تلفات قابل ملاحظه در آنها اشاره نمود.

مراجع

- [1] D.K. Gramotnev and S.I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit," Nat. Photonics, 4, (2010), 83-91.
- [2] H. Wei, Z. Wang, X. Tian, M. Kall, and H. Xu, "Cascaded logic gates in nanophotonic plasmon networks," Nat. Commun. 1388, (2011), 1-5.
- [3] F. Hu, H. Yi, and Z. Zhou, "Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities," Opt. Express, 19, (2011), 4848-4855.
- [4] T. Yabu, M. Geshibo, T. Kitamura, K. Nishida, and S. Sawa, "All-optical logic gates containing a two-mode nonlinear waveguide," IEEE J. Quantum Electron. 38, (2009), 37-46.
- [5] I.S. Maksymov, "Optical switching and logic gates with hybrid plasmonic-photonic crystal nanobeam cavities" Phys. Lett. A, 375, (2011), 918-921.
- [6] J. Qiu, K. Sun, M. Rochette, and L.R. Chen, "Reconfigurable All-Optical Multilogic Gate (XOR, AND, and OR) Based on Cross-Phase Modulation in a Highly Nonlinear Fiber," IEEE Photon. Technol. Lett. 22, (2010), 1199-1201.
- [7] K. Mukherjee, "A method of implementation of all optical logic gates based on two photon absorption in silicon wire waveguide," Int. J. Phys. Sci. 5, (2010), 1942-1947.
- [8] A. Dolatabady and N. Granpayeh, "All optical logic gates based on two dimensional plasmonic waveguide with nanodisk resonator," J. Opt. Soc. Korea, 16, (2012), 432-442.
- [9] Y. Fu, X. Hu, C. Lu, S. Yue, H. Yang, and Q. Gong, "All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides," Nano. Lett. 12, (2012), 5784-5790.

[۱۰] دولت‌آبادی علیرضا و گرانیپایه نصرت‌الله، گیت منطقی ایکس‌آر

پلاسمونی بر اساس ساختار نانو کاواک شکافی، بیست و یکمین

کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۳۹۳، ۵۴۸-۵۴۵.