بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

گیت منطقی ایکس‌اُر پلاسمونی بر اساس ساختار نانو کاواک شکافی

علیرضا دولت‌آبادی و نصرت‌الله گرانپایه

دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده – در این مقاله، یک گیت منطقی ایکس‌اُر تمام نوری پلاسمونی معرفی می‌شود. ساختار، شامل موج‌برهای فلز-عایق-فلز و نانوکاواک شکافی تشدیدگر است. رفتار گیت براساس آرایش خاص مدهای تشدید در این تشدیدگر است. عملکرد این گیت به صورت تحلیل عددی به روش تفاضل محدود در حوزه زمان تایید شده است.

کلید واژه- پلاسمونی، تفاضل محدود در حوزه زمان، فلز-عایق-فلز، کاواک تشدیدگر، گیت منطقی، نانوشکاف.

Plasmonic XOR Logic Gate Based on Nanoslot Cavity

[1]Alireza Dolatabady and [2*]Nosrat Granpayeh

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

[1]alirezadolatabady@ee.kntu.ac.ir, [2*]granpayeh@eetd.kntu.ac.ir

Abstract- In this paper, an all optical plasmonic XOR logic gate has been demonstrated. The structure includes metal-insulator-metal (MIM) waveguides with nanoslot cavity resonator. The gate behavior is based on the special arrangements of the resonant modes in the nanoslot cavity resonator. The behavior of the gate has been verified numerically using finite difference time domain (FDTD) method.

Keywords: Cavity resonator; FDTD; logic gate; MIM; nanoslot; plasmonic.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

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

۱- مقدمه

طی سال‌های اخیر استفاده از ادوات، پردازش‌گرها، و محاسبه‌گرهای نوری به عنوان یکی از ایده‌ها برای غلبه بر محدودیت‌های ناشی از به‌کارگیری ادوات و پردازش‌گرهای الکترونیک درنظر گرفته شده است. سامانه‌های الکترونیک که در آنها الکترون‌ها حامل اطلاعات هستند، دارای ویژگی‌های نامطلوبی مانند تاخیر ذاتی و نیز تولید تلفات زیاد هستند که می‌توانند توسط استفاده از ادوات نوری بهبود یابند. بررسی‌های گوناگون تجربی و نظری نشان داده‌اند که به‌کارگیری ادوات نوری، که در آنها از فوتون‌ها به عنوان حامل‌های اطلاعات استفاده می‌شود، منجر به سرعت بیشتر، ظرفیت بیشتر و نیز تلفات توان کمتر می‌شود [۱]. از دیگر سو، حد پراش نور، به عنوان یک محدودیت ذاتی ادوات نوری، از کاهش ابعاد ادوات نوری به ابعادی در حد مدارهای مجتمع نوری جلوگیری می‌کند [۲]. طی دهه اخیر، ادوات نوری متنوعی بر اساس انتشار امواج پلاسمون پلاریتون‌های سطحی به منظور نیل به مدارهای مجتمع تمام نوری معرفی و بررسی شده‌اند [۳]. پلاسمون پلاریتون‌های سطحی به عنوان امواج سطحی تحریک و منتشر شده در فصول مشترک فلز-عایق توصیف می‌شوند. این امواج توسط اندرکنش بین الکترون‌های آزاد در سطوح فلزی و نیز میدان‌های الکترومغناطیس در عایق، تحریک شده و به تدریج در جهت عمود بر فصول مشترک فلز-عایق میرا می‌شوند. بنابراین بسیار مقید به این فصول مشترک هستند. استفاده از ویژگی‌های منحصر به‌فرد انتشار این امواج سطحی امکان پیاده‌سازی ادوات نوری در ابعاد زیر طول‌موج، محدود کردن و هدایت امواج نوری را بدون مشکل حد پراش نور فراهم می‌کند [۲].

در روند نیل به طراحی پردازش‌گرهای نوری، گیت‌های نوری از بخش‌های پایه و اساسی به شمار می‌روند. تاکنون ایده‌ها و روش‌های بسیاری برای تحقق گیت‌های تمام نوری بررسی شده‌اند. برخی از آنها از اثرات غیرخطی نور استفاده کرده‌اند [۴]. در این قطعات از میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی خارجی برای ایجاد ویژگی‌های غیرخطی و در نتیجه عملگرهای منطقی موردنظر استفاده شده است. با این حال، استفاده از این روش، مشکلاتی را از قبیل افزایش اندازه گیت و تلفات توان به دلیل نیاز به استفاده از پالس‌های کنترلی پرتوان ایجاد می‌کند. پیش‌تر، یک گیت منطقی برپایه ساختاری متشکل از فوتونیک کریستال و براساس طراحی خاص، گزارش شده است [۵]. همچنین، عملکرد چندگانه منطقی بر اساس مدولاسیون خودفازی در فیبری با ویژگی غیرخطی بالا [۶]، و نیز گیت‌های منطقی تمام نوری پلاسمونی بر اساس ساختار تشدیدگر دیسک شکل [۷]، بررسی شده‌اند. به تازگی نیز، گیت‌هایی از شبکه‌هایی شامل نانوسیم‌های کربنی به هم پیوسته معرفی شده‌اند. این عملگرهای منطقی، با استفاده از تداخل وابسته به فاز و قطبش پرتوهای پلاسمونی منتشر شونده در این شبکه سیمی ایجاد شده‌اند [۱].

گیت‌های منطقی پلاسمونی نانومتری می‌توانند مسیری برای تحقق پردازش‌گرهای نوری نوین برای به‌کارگیری در فن‌آوری‌های محاسباتی آینده خلق کنند. با این حال، مهم‌ترین ضعف ساختارهای پلاسمونی شامل فلزات، نرخ تلفات غیرتشعشعی ناشی از تلفات فلزی است که به طور قابل ملاحظه‌ای به کاهش ضریب عملکرد آنها می‌انجامد.

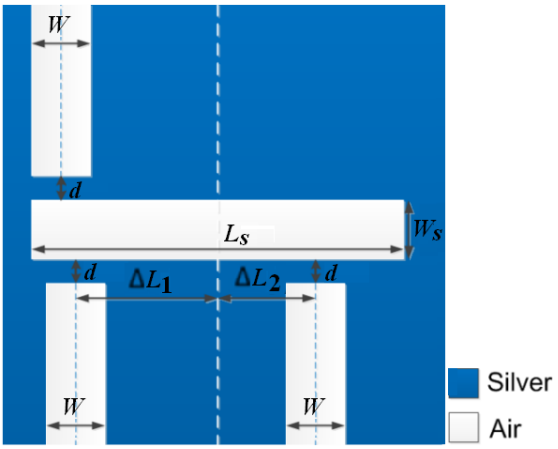
در این مقاله یک عملگر پایه منطقی، ایکس‌اُر، در یک ساختار ساده از نانوکاواک تشدیدگر ارائه می‌شود. این گیت تمام نوری بر اساس نانوموج‌برهای فلز-عایق-فلز شامل کاواک تشدیدگر شکافی، به عنوان عنصری پرکاربرد در ساختارهای پردازشی-محاسباتی نوری ارائه می‌شود. پیش‌تر، گیت‌هایی بر پایه نانوموج‌برهای شکافی به صورت تجربی بررسی و ساخته شده‌اند [۸]. ساختار پیشنهادی در [۸]، بر اساس ساختار Y-شکل متقارن، و با ایجاد نانوشکاف‌هایی بر لایه نازکی از طلا بوده و بر پایه سازنده یا مخرب بودن تداخل امواج عمل می‌کند. ساختار پیشنهادی ما نیز، براساس تداخل سازنده یا مخرب امواج ورودی به آن عمل می‌کند، اما شامل کاواکی تشدیدگر است و در مقایسه با ساختار پیشنهادی در [۸]، از طول کوتاه‌تری برخوردار است. ساختار این مقاله بدین شرح است: در بخش ۲، ساختار اصلی معرفی می‌شود. در بخش ۳، نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شوند و در پایان چند نتیجه‌گیری در بخش ۴ خلاصه می‌شوند.

۲- ساختار ارائه شده و توصیف عملکرد آن

نمای ساختاری این گیت منطقی پلاسمونی که شامل سه موج‌بر فلز-عایق-فلز و یک نانوکاواک شکافی مستطیلی شکل است، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. یک ساختار

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

ساده‌تر که تنها شامل دو پایانه است، پیش‌تر به عنوان یک فیلتر میان‌گذر توسط هو و همکارانش بررسی شده‌اند [۳]. در این‌جا بر اساس این ساختار، یک گیت منطقی ایکس‌اُر، طراحی شده است.



شکل ۱: ساختار پیشنهاد شده برای تحقق گیت. پارامترهای W، W_S، L_S، d، ΔL_1 و ΔL_2، به ترتیب نمایان‌گر پهنای موج‌برهای ورودی و خروجی، پهنای 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 ایکس‌اُر.

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

در جدول ۱، جدول درستی یک گیت ایکس‌اُر مشاهده می‌شود. در ساختار شکل ۱، دو پایانه، در موج‌برهای عمودی در پایین شکل (سمت چپ و راست) به عنوان ورودی‌های گیت مورد نظر تعیین می‌شوند. همچنین موج‌بر بالایی (سمت چپ)، به عنوان خروجی گیت درنظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در حالت‌هایی که تنها یکی از دو ورودی این گیت مقدار داشته باشد (۱ منطقی باشد)، خروجی نیز مقداری غیر صفر خواهد داشت. تحقق این دو حالت را می‌توان با اعمال یک موج از هر یک از این دو موج‌بر ورودی سمت چپ یا راست تحقق بخشید. حالت دیگر، حالتی است که هر دو ورودی گیت مقدار صفر داشته باشند، که در این حالت خروجی نیز صفر خواهد بود. تنها حالت باقی مانده، حالتی است که در آن هر دو ورودی مقدار غیر صفر (۱ منطقی) داشته باشند. در این حالت، با توجه به جدول ۱، خروجی نیز مقدار صفر خواهد داشت و تحقق این حالت نیازمند طراحی است.

ایجاد شرایط موج ایستا در ساختاری شبیه شکل ۱، در [۳] به صورت تحلیلی بررسی شده است. تشکیل موج ایستا در این نانو کاواک شکافی مستطیل شکل تشدیدگر، به طول کاواک، و ثابت انتشار مد منتشر شونده در آن وابسته است. با انتخاب مناسب مقادیر ΔL_1 و ΔL_2 می‌توانیم به ایجاد تداخل سازنده یا مخرب موج در ساختار برسیم. اگر در آرایش شکل ۱، $\Delta L_2=\Delta L_1$ را انتخاب نماییم، می‌توانیم باعث ایجاد دو مد تداخلی مخرب شویم. به کمک این ایده می‌توانیم به طراحی گیت تمام نوری منطقی مورد نظر دست پیدا کنیم. نتایج شبیه‌سازی چنین طرحی در بخش ۳ خلاصه شده‌اند.

بخش فلزی ساختار پیشنهادی، نقره انتخاب شده است، در حالی‌که ماده عایق هواست و ضریب گذردهی الکتریکی برابر با ۱ دارد. ضریب گذردهی الکتریکی مختلط و وابسته به فرکانس نقره که در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، توسط مدل درود به صورت زیر توصیف می‌شود [۷]:

$$\varepsilon_m(\omega)=\varepsilon_\infty-\frac{\omega_p^2}{\omega^2-j\gamma\omega} \qquad (۱)$$

که در آن ε_∞ گذردهی الکتریکی در فرکانس بی‌نهایت، ω_p فرکانس پلاسمای حجمی، و γ فرکانس زاویه‌ای میراکننده هستند. این پارامترها برای فلز نقره به‌ترتیب برابر با ۳/۷، ۹/۱ eV، و ۰/۰۱۸ eV هستند. ω نیز نشان‌گر فرکانس زاویه‌ای موج تابشی است [۷].

۳- نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- ملاحظات کلی شبیه‌سازی

در طول فرآیند شبیه‌سازی‌ها، معادلات ماکسول به صورت عددی توسط روش دوبعدی تفاضل محدود در حوزه زمان[1] حل شده‌اند. برای ایجاد این روش مطابق الگوریتم یی[2]، ابعاد سلول‌های واحد شبیه‌سازی برابر با $\Delta x=\Delta y=5$nm انتخاب شده‌اند. جذب میدان‌های نزدیک شونده به کرانه‌های فضای شبیه‌سازی، با پیاده‌سازی

[1] Finite Difference Time Domain: FDTD
[2] Yee

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

شرایط مرزی CPML[3] ارضا شده‌اند.

پارامترهای ساختاری مطابق تعاریف مشاهده شده در شکل ۱، به صورت $W=Ws=100$ nm، $Ls=565$ nm، $d=15$ nm، و $\Delta L_1=\Delta L_2=((L_s-W)/2)$ انتخاب شده‌اند. جهت پیاده‌سازی الگوریتم FDTD، کدی در نرم‌افزار متلب نوشته شده است.

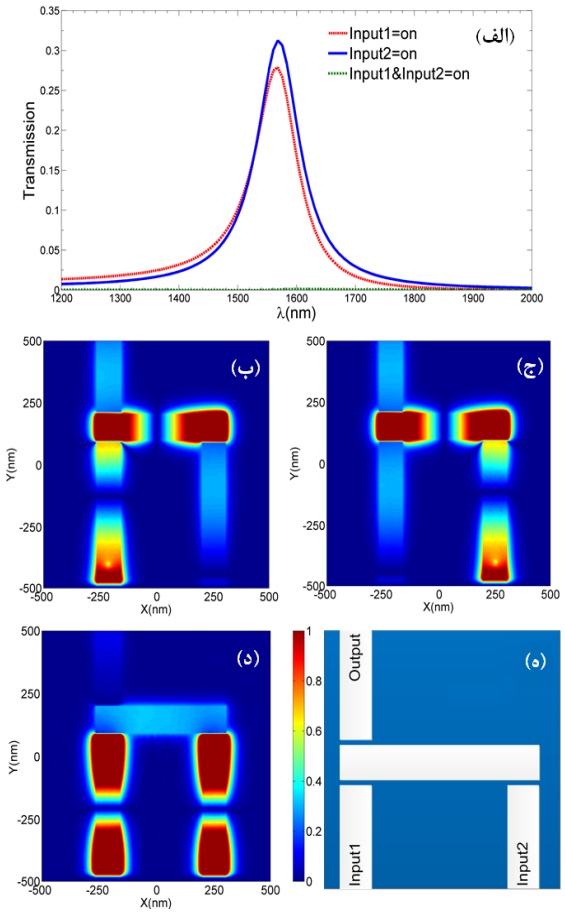
۳-۲- نتایج شبیه‌سازی

شکل ۲-الف، طیف انتقال توان گیت تمام نوری پیشنهادی را در هر سه حالت آخر متناظر با جدول ۱ نشان می‌دهد. این طیف، از محاسبه نسبت توان خروجی به توان ورودی در یکی از موج‌برهای ورودی (شدت موج ورودی هر دو موج‌بر ورودی یکسان فرض شده است) و در حوزه فرکانس محاسبه شده است. برای دو حالتی که تنها یکی از ورودی‌های موج‌برها روشن (۱ منطقی) هستند، نسبت انتقال توان از ورودی به خروجی برابر با ۰/۳۲ است. این مقدار را می‌توان به منزله میزان ۱ منطقی در خروجی تعریف نمود. در حالتی‌که هر دو ورودی روشن (۱ منطقی) هستند نیز، خروجی میزان ناچیزی دارد که می‌توان آنرا به منزله ۰ منطقی درنظر گرفت. بیشینه منحنی‌های یاد شده در طول موج ۱۵۶۸ نانومتر (که متناظر با یکی از طول‌موج‌های تشدید کاواک با ابعاد یاد شده است) مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۲-ب تا ۲-د نیز پروفایل شدت میدان مغناطیسی ساختار گیت نهایی شکل ۲-ه در طول‌موج ۱۵۶۸ نانومتر مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک گیت منطقی ایکس‌اُر تمام نوری بر اساس ساختار نانوکاواک شکافی معرفی شد. نتایج شبیه‌سازی عملکرد این گیت بر اساس روش تحلیل عددی تفاضل محدود در حوزه زمان بررسی شدند. می‌توان با درنظرگرفتن طرح‌های دیگر، سایر عملگرهای منطقی را نیز تحقق بخشید. همچنین می‌توان با تغییر پارامترهای ساختاری، میزان تعریف شده ۰ و ۱ منطقی و نیز طول‌موج کار را برای اهداف خاص تعیین نمود.

[3] Convolutional Perfectly Matched Layers: CPML



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

مراجع

[1] H. Wei, Z. Wang, X. Tian, M. Kall, and H. Xu, "*Cascaded logic gates in nanophotonic plasmon networks*," **Nat. Commun**. 1388, (2011), 1-5.

[2] D.K. Gramotnev and S.I. Bozhevolnyi, "*Plasmonics beyond the diffraction limit*," **Nat. Photonics**, 4, (2010), 83-91.

[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] 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.

[8] 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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]