

«مقاله پژوهشی»

طراحی و شبیه‌سازی دروازه منطقی تمام نوری AND با استفاده از بلور فوتونی دو بعدی

مرتضی پیش بینی*

استادیار گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: 1401/06/13

تاریخ دریافت: 1401/04/12

Design and Simulate AND Logic Gate Based on Two-Dimensional Photonic Crystal

M. Pishbini*

Assistant Professor, Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2022/07/03

Accepted: 2022/09/04

Abstract

In this paper, the AND all-optical logic gates using of two-dimensional photonic crystals have been designed and simulated. In the proposed all-optical AND gate, photonic crystals are placed in a square lattice with dielectric rods in the air substrate, which are designed with "H" semi-shaped defects in order to achieve the requirements of high-speed networks. Also, the performance of the all-optical AND logic gate was analyzed using the finite difference time domain method. The plane wave expansion method was used to obtain the gap band structure. The results show that the AND logical gate proposed to work at 1550 nm optical wavelength with high contrast ratio and minimum delay time used in optical devices and potential applications in optical sensors and optical integrated circuits.

Keywords

Photonic Crystal, All Optical Logic Gate, AND Logic Gate

چکیده

در این مقاله، دروازه‌های منطقی تمام نوری AND با استفاده از بلورهای فوتونی دو بعدی مورد طراحی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. در دروازه تمام نوری AND پیشنهادی، بلورهای فوتونی در شبکه مربعی با میله‌های دی الکتریک در بستر هوا قرار دارند که با نقص شبه "H" شکل به منظور دستیابی به الزامات شبکه‌های پرسرعت، طراحی گردیدند. همچنین عملکرد دروازه منطقی تمام نوری AND با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان تحلیل شد و برای به دست آوردن ساختار نوار باند ممنوعه از روش بسط موج تخت استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که دروازه منطقی AND پیشنهادی برای کار در طول موج نوری 1550 نانومتر با نسبت کنتراست بالا و حداقل زمان تأخیر، می‌تواند در ادوات نوری مورد استفاده قرار گیرد و پتانسیل کاربردی در ساخت انواع حسگرهای نوری و مدارهای مجتمع نوری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی

بلورهای فوتونی، دروازه منطقی تمام نوری، دروازه منطقی AND

مقدمه

در سال‌های اخیر، ارتباطات نوری نقشی حیاتی در فناوری مدرن ایفا کرده‌اند، به طوری که توانسته‌اند تأثیر فوق العاده‌ای در پیشرفت جامعه داشته باشند. ویژگی‌های مهم توسعه ادوات نوری، شامل سرعت پردازش بالا و مجتمع‌سازی آنها بوده که باعث مصرف انرژی کمتر شده است. همچنین افزایش سرعت بالای انتقال داده در سامانه‌های نوری همواره مورد توجه بوده است [1].

در شبکه‌های ارتباطی نوری، دروازه‌های منطقی نوری توجه بیشتری را از سوی محققان به خود جلب کرده‌اند. دروازه‌های منطقی قادر به انجام بسیاری از توابع منطقی با کاربردهای متعدد هستند [2].

برای تأیید صحت داده‌ها، دروازه منطقی AND، دروازه منطقی NOT و دروازه منطقی XOR برای سوئیچینگ و رمزگذاری یا رمزگشایی داده‌ها استفاده می‌شوند [3].

مکانیسم‌های مختلفی برای طراحی دروازه‌های منطقی مبتنی بر بلور فوتونی مانند تقویت‌کننده‌های نوری نیم هادی [4، 5]، تداخل سنج ماخ زندر [6]، موجبرهای تداخل چند حالتی [7] و پرتوهای خود تنظیم شونده [8] و غیره وجود دارد.

چندین دستگاه با استفاده از بلورهای فوتونی مانند دی مولتی پلکسرها [9، 10]، رمزگذارها [11، 12]، رمزگشاها [13]، تقسیم‌کننده‌های توان [14]، فیلترهای نوری [15]، سوئیچ‌ها [17] و حسگرهای نوری طراحی شده‌اند [18-20].

دروازه منطقی، در واقع شالوده اولیه مدار دیجیتال شامل سه ورودی، دو ورودی یا تنها یک ورودی نور فرودی است [21]. پژوهشگران ساختار مبتنی بر تشدیدگر حلقه‌ای شش ضلعی برای دروازه منطقی OR با نسبت کنتراست $7/27$ دسی بل پیشنهاد کرده‌اند [22]. پارامترهای عملکردی مانند نسبت کنتراست، زمان پاسخ و توان خروجی از مهم‌ترین نکات قابل بررسی در طراحی انواع دروازه‌های منطقی تمام نوری است [23].

همچنین پژوهشگران با ایجاد نقص E شکل در شبکه بلور فوتونی برای دستیابی به دروازه‌های منطقی NOR و AND توانسته‌اند به نرخ بیت $1/54$ ترابیت بر ثانیه برای ساختار پیشنهادی دست یابند [24].

همچنین تا کنون تجزیه و تحلیل عددی دروازه منطقی NOT و AND با استفاده از تقویت‌کننده نوری نیمه هادی مبتنی بر بلور فوتونی نیز بررسی شده‌اند [25]. در گزارشی دیگر، اتصال T شکل با استفاده از دروازه منطقی NOT و XOR که از سه موجبر تشکیل شده بود، نشان داد که نسبت کنتراست این سامانه نوری، بالای $43/38$ دسی بل است [26].

اگرچه تلاش‌های متعددی برای طراحی دروازه‌های منطقی تمام نوری با استفاده از بلورهای فوتونی انجام شده است، اما همچنان برای کاربردهای صنعتی نیاز به بهبود دارند. از این رو، در این مقاله، با استفاده از بلور فوتونی، ساختار دروازه منطقی AND در دو حالت طراحی و شبیه‌سازی شده و پارامترهای عملکردی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

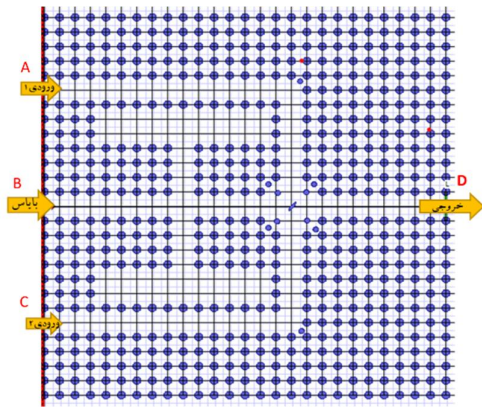
طراحی ساختار

طراحی ساختار بلور فوتونی دوبعدی تمام نوری شامل آرایه مربعی 27×27 است که از میله‌های دی الکتریک با ضریب شکست $3/1$ استفاده شده است. شعاع میله‌های دی الکتریک 150 نانومتر برای دروازه منطقی با دو ورودی و 130 نانومتر برای دروازه منطقی با سه ورودی در نظر گرفته شد.

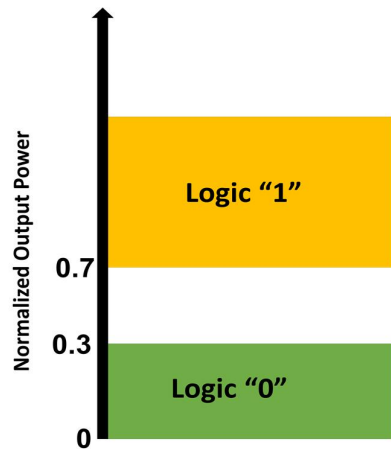
برای کاهش تلفات توان سیگنال و به حداقل رساندن اندازه ساختار، طرح پیشنهادی با ایجاد یکسری نقص بهینه شد. ساختار دروازه منطقی AND تمام نوری با دو ورودی در شکل 1 و با سه ورودی در شکل 2 نشان داده شده است. ساختار به گونه‌ای طراحی گردیده است که اثر پراکندگی معکوس امواج الکترومغناطیسی فرودی به خصوص درون ساختار H شکل و همچنین قبل از خروجی از بین رفته و عملکرد تشدید درون بازوهای ایجاد شده در بالا و پایین ساختار H شکل به سهولت انجام شود.

در ساختار فوق، بازوهای ایجاد شده و نقص‌های موجود در شبکه بلور فوتونی، مانع از تزویج نور از موجبر ورودی 1 به موجبر ورودی 2 می‌شوند.

از ویژگی‌های مهم بلورهای فوتونی این است که در محدوده فرکانس‌های معینی انتشار امواج الکترومغناطیسی در ساختار بلور فوتونی ممنوع است. ایجاد انواع نقص در ساختار بلور فوتونی باعث می‌شود که مسیر ایجاد شده درون



شکل 2. ساختار دروازه منطقی تمام نوری با 3 ورودی



شکل 3. محدوده توان خروجی نرمالیزه شده برای تعیین منطق دروازه نوری

نتایج

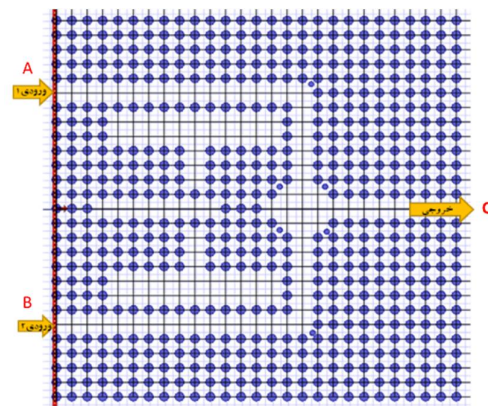
برای محاسبه ساختار نوار باند ممنوعه از روش گسترش موج تخت استفاده گردید. نوار باند ممنوعه اغلب به ثابت دی الکتریک، ثابت شبکه و شعاع میله بستگی دارد و با ایجاد یک نقص در ساختار تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شکل 4 نمودار نوار باند ممنوعه برای دروازه منطقی تمام نوری با دو ورودی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که این ساختار دارای دو نوار باند ممنوعه در مد انتشاری میدان الکتریکی عرضی به این صورت که اولین نوار باند ممنوعه در محدوده فرکانسی 0/5148 تا 0/6541 و دومین نوار باند ممنوعه در بازه 0/910 تا 1/0984 به دست آمد.

ساختار به صورت موجبر برای انتشار فرکانس‌های ممنوعه عمل کند. بنابراین، می‌توان دروازه‌های منطقی تمام نوری را با تنظیم موجبرهای مناسب برای هر ورودی طراحی کرد تا توابع دروازه‌های منطقی تحقق یابد. یکی از دلایل طراحی ساختار پیشنهادی در این مقاله برای دروازه منطقی، اثر تداخل است. به طور کلی، مقادیر منطقی «1» و «0» به ترتیب با معرفی تداخل سازنده و مخرب در درگاه خروجی در نظر گرفته شدند.

اگر سیگنال‌های ورودی با یک اختلاف فاز $2n\pi$ تداخل کنند، جایی که n یک عدد صحیح است، این منجر به تداخل سازنده می‌شود. در مقابل، اگر اختلاف فاز سیگنال‌های ورودی $(2n+1)\pi$ در جایی باشد که به هم می‌رسند، یک تداخل مخرب رخ می‌دهد. عملکرد دروازه‌های منطقی با محاسبه نسبت کنتراست مورد مطالعه قرار می‌گیرد که نسبت بین توان خروجی منطق «1» و منطق «0» به شرح زیر است:

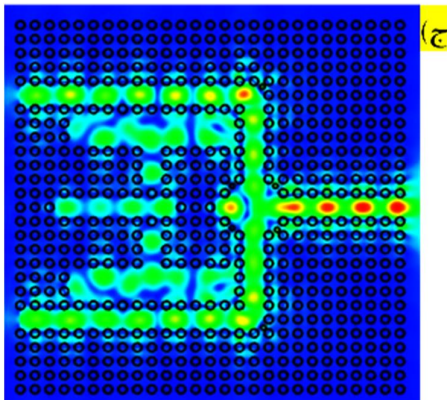
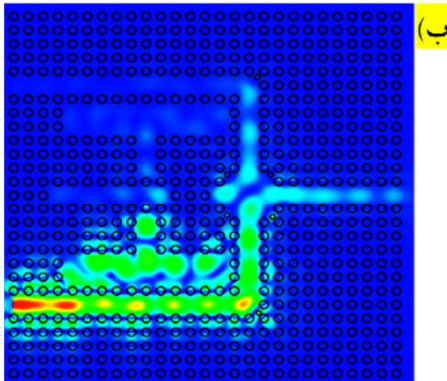
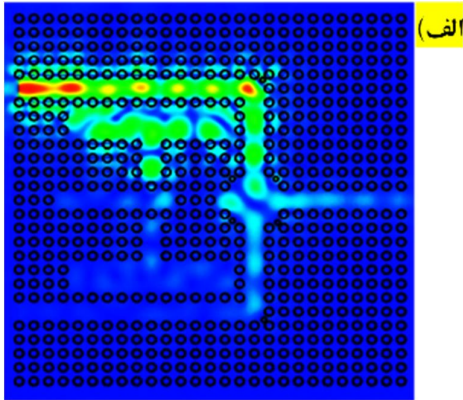
$$CR(\text{dB}) = 10 \log(P_1/P_0) \quad (1)$$

که در آن P_0 و P_1 مقادیر توان در درگاه خروجی برای منطق «1» و منطق «0» هستند. ما از منبع نوری P_0 برای راه‌اندازی به درگاه‌های ورودی دروازه‌های منطقی استفاده کردیم. توان به‌دست آمده در درگاه خروجی اگر توان کمتر یا مساوی $0/3P_0$ باشد، منطق «0» در نظر گرفته می‌شود و اگر توان بیشتر یا مساوی $0/7P_0$ باشد، همان طور که در شکل 3 نشان داده شده است، منطق «1» در نظر گرفته می‌شود.

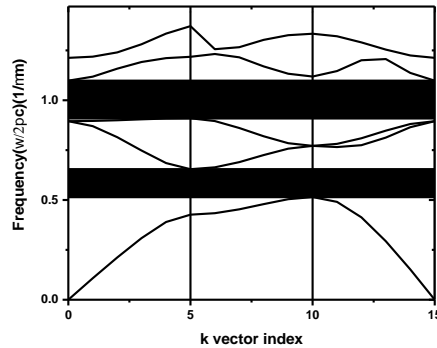


شکل 1. ساختار دروازه منطقی تمام نوری با 2 ورودی

ناشی از هندسه ساختار و تزویج نور درون موجبرهای بلور فوتونی، به درگاه خروجی می‌رسند (شکل 5-ج).



شکل 5. نحوه توزیع میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی که درون ساختار دروازه منطقی تمام نوری از طریق درگاه‌های الف) فقط ورودی اول ب) فقط ورودی دوم ج) هر دو به صورت همزمان، با طول موج 1550 نانومتر منتشر می‌شود.



شکل 4. نمودار نوار باند ممنوعه ساختار بلور فوتونی دو بعدی برای ساختار دروازه منطقی تمام نوری با دو ورودی

برای دستیابی به نتیجه مطلوب، اندازه و ضریب شکست میله‌های دی الکتریک در تشدیدکننده حلقه H شکل گام به گام تغییر کردند. سپس اندازه و ضریب شکست میله بر اساس حداکثر توان خروجی آن بهینه گردید. 6 میله با شعاع کمتر از میله‌های دی الکتریک درون ساختار در نقاط معینی قرار داده شد. شکل 5 توزیع میدان الکتریکی امواج الکترومغناطیسی فرودی با طول موج 1550 نانومتر، درون ساختار دروازه منطقی AND با دو ورودی نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که هنگامی که طول موج نور فرودی برابر 1550 نانومتر باشد، سه حالت زیر درون ساختار بوجود می‌آید:

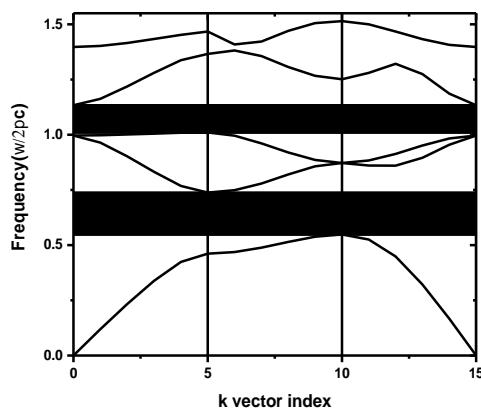
1) هنگامی که ورودی 1 (A) روشن و ورودی 2 (B) خاموش است، امواج الکترومغناطیسی فرودی در داخل ساختار منتشر نشده و خروجی به دست نمی‌آید (شکل 5-الف).

2) هنگامی که ورودی 1 (A) خاموش و ورودی 2 (B) روشن است، به علت وجود نقص‌های ایجاد شده در ساختار نور فرودی درون موجبرهای بلور فوتونی جفت شده و خروجی به دست نمی‌آید (شکل 5-ب).

3) هنگامی که هر دو ورودی روشن باشند، در این صورت نور فرودی در داخل ساختار منتشر می‌شود. بنابراین امواج الکترومغناطیسی فرودی به دلیل شرایط تشدید خاص

الکترونیک برابر 130 نانومتر و ضریب شکست و خواص مواد در تشدیدکننده همانند ساختار طراحی شده قبلی است.

در شکل 6 نمودار نوار باند ممنوعه برای دروازه منطقی AND با چهار حالت ورود نور فرودی به ساختار نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که این ساختار دارای دو نوار باند ممنوعه است که اولین نوار باند ممنوعه در محدوده فرکانسی 0/5184 تا 0/7375 و دومین نوار باند ممنوعه در بازه 1/009 تا 1/1334 است.



شکل 6. نمودار نوار باند ممنوعه برای دروازه منطقی AND با سه ورودی نور فرودی

هنگامی که امواج الکترومغناطیسی فرودی از طریق درگاه بایاس منتشر می‌شوند، عملکرد کلی سیستم در درگاه خروجی افزایش می‌یابد. مطابق جدول 2 وقتی که فقط ورودی بایاس روشن باشد، خروجی به دست نمی‌آید. هنگامی که هر یک از ورودی‌ها به تنهایی روشن و با ورودی بایاس در نظر گرفته شود، باز هم خروجی به دست نمی‌آید. با این حال زمانی که هر سه درگاه نور فرودی روشن باشند، خروجی به دست می‌آید.

جدول 1 منطق دروازه نوری AND را برای دو ورودی نشان می‌دهد. مطابق جدول فوق، وقتی هر دو ورودی روشن هستند ($A=B=1$)، یک خروجی وجود دارد ($C=1$)، هنگامی که تنها یکی از ورودی‌ها روشن است ($A=1$ یا $B=1$)، هیچ خروجی به دست نمی‌آید. هنگامی که هر دو ورودی خاموش هستند، ($A=0$ یا $B=0$) هیچ خروجی به دست نمی‌آید.

بنابراین هنگامی که موج الکترومغناطیسی در درگاه ورودی A یا B وارد ساختار می‌شود، موج ورودی در داخل موجبر منتشر شده تا با تشدید کننده جفت شود و در ادامه سیگنال به دو قسمت تقسیم می‌شود. در این مرحله، یک اختلاف فاز بین دو قسمت ساختار، به دلیل اختلاف مسیر ایجاد می‌شود که منجر به تداخل مخرب جزئی می‌گردد و سیگنال در درگاه خروجی ضعیف می‌شود؛ به طوری که مقدار منطقی خروجی '0' به دست می‌آید. در حالی که به صورت همزمان سیگنال در درگاه ورودی A و B منتشر شود، به دلیل طول مسیر مشابه از درگاه ورودی A به درگاه خروجی C و از درگاه ورودی B به درگاه خروجی C، قسمت‌هایی از موج منتشر شده از هر دو درگاه ورودی A و B به طور سازنده در درگاه خروجی C تداخل خواهد داشت. بنابراین سیگنال دریافت شده در درگاه خروجی مطابق با منطق «1» است.

جدول 1. منطق دروازه نوری AND برای دو ورودی

درگاه خروجی	درگاه خروجی A	درگاه خروجی B	درگاه خروجی C	توان خروجی
0	0	0	0	0
1	1	0	0	$0/125P_0$
0	0	1	0	$0/145P_0$
1	1	1	1	$0/975P_0$

همچنین در صورتی که دروازه منطقی AND پیشنهادی دارای سه درگاه ورودی نور باشد در این صورت درگاه ورودی 1 و درگاه ورودی 2 به همراه درگاه مرجع (بایاس) برای انتشار امواج الکترومغناطیسی در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای ساختاری مانند شعاع میله‌های دی

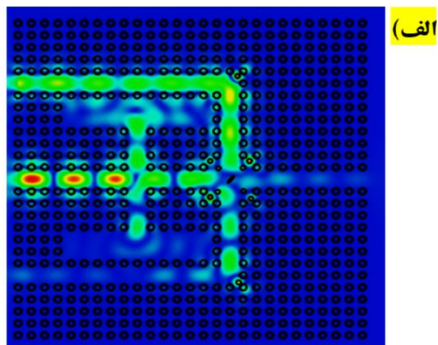
جدول 2. درستی دروازه منطقی تمام نوری برای سه ورودی

درگاه	درگاه	درگاه	درگاه	توان
خروجی A	خروجی B	خروجی C	خروجی D	خروجی
0	0	1	0	$0/012P_0$
1	0	1	0	$0/135P_0$
0	1	1	1	$0/165P_0$
1	1	1	1	$0/987P_0$

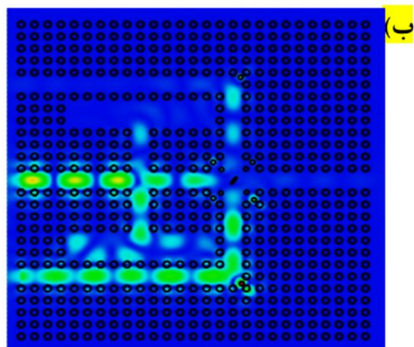
شکل 6 نحوه توزیع میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی را درون ساختار دروازه منطقی تمام نوری از طریق درگاه‌های ورودی نور فرودی در چهار حالت نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که فقط در حالتی که تمامی ورودی‌های امواج الکترومغناطیسی با طول موج 1550 نانومتر قابلیت انتشار نور درون ساختار را دارند، خروجی نور به دست می‌آید.

بحث و نتیجه‌گیری

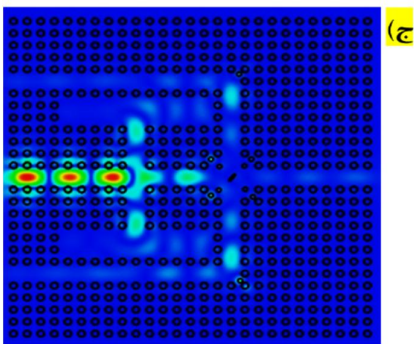
طراحی و شبیه‌سازی دروازه منطقی تمام نوری AND با دو ورودی و سه ورودی بر اساس بلورهای فوتونی دو بعدی پیشنهاد و طراحی گردید. طول موج تشدید نور فرودی با 1550 نانومتر به ساختار دروازه منطقی AND در نظر گرفته شد. پارامترهای عملکردی با استفاده از روش تفاضل المان محدود حوزه زمانی محاسبه شدند. نتایج حاصل از نحوه توزیع نور فرودی درون ساختار و نمودار توان نرمالیزه نشان دادند که به دلیل عملکرد مناسب و پاسخ دهی سریع، دروازه‌های منطقی فوق برای شبکه‌های نوری با سرعت بالا در آینده پتانسیل کاربردی فراوانی دارند. از این رو این ساختارها را می‌توان در محاسبات با سرعت بالا، مدارهای مجتمع فوتونیک و دستگاه‌های سوئیچینگ مورد استفاده قرار داد.



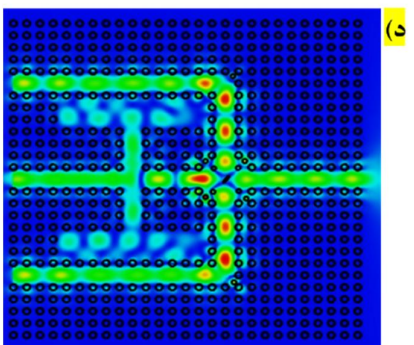
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل 7. نحوه توزیع میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی که درون ساختار دروازه منطقی تمام نوری از طریق درگاه‌های (الف) فقط ورودی اول و ورودی بایاس روشن باشند (ب) فقط ورودی دوم و ورودی بایاس روشن باشند (ج) فقط ورودی بایاس روشن باشد (د) تمامی ورودی‌ها روشن باشند

References

- [1] Montalbano M. High-speed calculation of the critical paths of large networks. *IBM Systems Journal*. 1967;6(3): 163-91.
- [2] Fushimi A, Tanabe T. All-optical logic gate operating with single wavelength. *Optics express*. 2014 Feb 24;22(4): 4466-79.
- [3] Sun K, Qiu J, Rochette M, Chen LR. All-optical logic gates (XOR, AND, and OR) based on cross phase modulation in a highly nonlinear fiber. In 2009 35th European Conference on Optical Communication 2009 Sep 20 (pp. 1-2). IEEE.
- [4] Ebrahimzadeh M, Salaki M. Investigation of Optical Properties of Ellipsoidal Metal Nanoparticles at Different Scales and Dielectric Environments. *Biquarterly Journal of Optoelectronic*. 2021 Aug 23;3(2): 51-62.
- [5] Faenov AY, Khakhalin SY, Kolomensky AA, Pikuz SA, Samokhin AI, Skobelev IY. Superdense high-temperature exploded-wire plasma observations in a high-current vacuum diode. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1985 Jul 14;18(7): 1347.
- [6] Lombardi P, Schaefer F, Herrera I, Cherukattil S, Petrovic J, Lovecchio C, Marin F, Cataliotti FS. Reading the phase of a Raman excitation with a multi-state atomic interferometer. *Optics Express*. 2014 Aug 11;22(16): 19141-8.
- [7] Petrovic J, Herrera I, Lombardi P, Schaefer F, Cataliotti FS. A multi-state interferometer on an atom chip. *New Journal of Physics*. 2013 Apr 4;15(4): 043002.
- [8] Herrera I, Petrovic J, Lombardi P, Schäfer F, Cataliotti FS. Light pulse analysis with a multi-state atom interferometer. In *AIP Conference Proceedings* 2014 Dec 4 (Vol. 1633, No. 1, pp. 237-239). American Institute of Physics.
- [9] Ebrahimzadeh M, Ghaffari M, Ghaffari L. The Effect of External Magnetic Field on the Creation of Energy Levels Degeneracy in a Quantum Anti-Dot. *Biquarterly Journal of Optoelectronic*. 2021 Feb 19;3(1): 81-8.
- [10] Doykov I, Baldwin T, Spiewak J, Gilmore KC, Gibbons JM, Pade C, Reynolds CJ, McKnight Á, Noursadeghi M, Maini MK, Manisty C. Quantitative, multiplexed, targeted proteomics for ascertaining variant specific SARS-CoV-2 antibody response. *Cell Reports Methods*. 2022 Sep 19;2(9): 100279.
- [11] Teneketzis D. On the structure of optimal real-time encoders and decoders in noisy communication. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006 Aug 28;52(9): 4017-35.
- [12] Zhu X, Pedrycz W, Li Z. Granular encoders and decoders: A study in processing information granules. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2016 Aug 5;25(5): 1115-26.
- [13] Zheng Z, Zhong Y, Tian S, Ma A, Zhang L. ChangeMask: Deep multi-task encoder-transformer-decoder architecture for semantic change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022 Jan 1;183: 228-39.
- [14] Wu L, Sun Z, Yilmaz H, Berroth M. A dual-frequency Wilkinson power divider. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2006 Jan 10;54(1): 278-84.
- [15] Philip J, Jaykumar T, Kalyanasundaram P, Raj B. A tunable optical filter. *Measurement Science and Technology*. 2003 Jul 16;14(8): 1289.
- [16] Zhang Q, Huang XG, Lin XS, Tao J, Jin XP. A subwavelength coupler-type MIM optical filter. *Optics express*. 2009 Apr 27;17(9): 7549-54.
- [17] Fruhling C, Ozlu MG, Saha S, Boltasseva A, Shalaev VM. Understanding all-optical switching at the epsilon-near-zero point: a tutorial review. *Applied Physics B*. 2022 Feb;128(2): 34.
- [18] Umapathi R, Park B, Sonwal S, Rani GM, Cho Y, Huh YS. Advances in optical-sensing strategies for the on-site de-

- tection of pesticides in agricultural foods. *Trends in Food Science & Technology*. 2022 Jan 1;119: 69-89.
- [19] Arabi M, Chen L. Technical challenges of molecular-imprinting-based optical sensors for environmental pollutants. *Langmuir*. 2022 May 5;38(19): 5963-7.
- [20] Aoni RA, Manjunath S, Karawdeniya BI, Zangeneh Kamali K, Xu L, Damry AM, Jackson CJ, Tricoli A, Miroshnichenko AE, Rahmani M, Neshev DN. Resonant dielectric metagratings for response intensified optical sensing. *Advanced Functional Materials*. 2022 Jan;32(3): 2103143.
- [21] Abdulwahid SH, Wadday AG, Sattar SM. New structure for an all-optical logic gate based on hybrid plasmonic square-shaped nanoring resonators and strips. *Optical and Quantum Electronics*. 2022 Sep;54(9): 607.
- [22] Geerthana S, Syedakbar S, Sridarshini T, Balaji VR, Sitharthan R, Sundar DS. 2D-PhC based all optical AND, OR and EX-OR logic gates with high contrast ratio operating at C band. *Laser Physics*. 2022 Sep 30;32(10): 106201.
- [23] Lin CE, Sun CP, Chen CC. Utilizing optical neural network to establish high-performance OR and XOR logic gates. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023 Mar 1;119: 105788.
- [24] F. Parandin and M. M. Karkhanehchi, "Terahertz all-optical NOR& AND logic gates based on 2D photonic crystals," *Superlattice. Microst.*, vol. 101, pp. 253–260, 2017
- [25] A. Kotb, K. E. Zoiros, and C. Guo, "160 Gb/s photonic crystal semiconductor optical amplifier-based all-optical logic NAND gate," *Photonic Netw. Commun.*, vol. 35, no. 1, pp. 246–255, 2018
- [26] J. K. Jayabharathan, G. Subhalakshmi, and S. Robinson, "Performance evaluation of two dimensional photonic crystal all optical AND/OR logic gates," *J. Opt. Commun.*, vol. 39, no. 3, 2018.

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors Licensee PNU, Tehran, Iran This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4 0 International (CC BY4 0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4 0>)