

## طراحی گیت منطقی AND تمام نوری مبتنی بر بلور فوتونی با ابعاد بسیار کم و مناسب برای مدارهای مجتمع نوری

احمد محب‌زاده بهابادی<sup>۱</sup>، سعید علیائی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۲- استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی (دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۲)

**چکیده:** در این مقاله با استفاده از شبکه بلور فوتونی دو بعدی یک ساختار فشرده و ساده به منظور ایجاد گیت منطقی تمام نوری AND معرفی شده است. ساختار طراحی شده متشکل از سه موج بر بلور فوتونی است که توسط یک نانو تشدیدگر به هم متصل شده‌اند. نانو تشدیدگر با افزایش شعاع میله دی‌الکتریک شکل گرفته است. تحلیل و بررسی‌ها با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان و بسط امواج تخت صورت گرفته است که روش بسط امواج تخت برای به دست آوردن شکاف باند فوتونی و روش تفاضل متناهی در حوزه زمان برای بررسی رفتار میدان الکترومغناطیس در ساختار بلور فوتونی استفاده شده است. مزایای این طراحی ابعاد کوچک، بالا بودن امکان تحقق، هماهنگی با فناوری سیلیکون و بالا بودن توان خروجی در حالت یک منطقی است. زمان تأخیر این گیت برابر با ۰/۳۲ ps است. نسبت کمینه توان نوری دریافت شده به توان ورودی در حالت یک منطقی برابر با ۱/۹۶۸ و نسبت بیشینه توان نوری به توان ورودی در حالت صفر منطقی ۰/۴۹۲ است. در نتیجه میزان نسبت کنتراست برای گیت طراحی شده برابر با ۶ dB است. بالا بودن توان نور در خروجی، گیت منطقی طراحی شده را قادر می‌سازد گیت‌های منطقی طبقه بعدی را فعال سازد و در مدارات مجتمع قرار گیرد. با توجه به ویژگی‌های مطرح شده این گیت منطقی می‌تواند در مدارات مجتمع تمام نوری استفاده شود.

**کلیدواژه‌ها:** گیت منطقی تمام نوری، نانو تشدیدگر، مدارات مجتمع نوری، اثر تداخل، نسبت کنتراست، زمان پاسخ

### ۱- مقدمه

انتشار در شبکه بلوری را ندارند. نوری که طول موج آن در شکاف باند فوتونی قرار دارد به راحتی در نقص خطی ایجاد شده در ساختار، حرکت می‌کند بدون این‌که در ساختار پخش شود. همچنین بلورهای فوتونی دارای ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر تلفات ناچیز، سرعت گروه بسیار پایین، انعطاف‌پذیری در شکل و ابعاد، گزینش بسامدی و هم‌چنین امکان پیاده‌سازی و هماهنگی با فناوری مدارات مجتمع نوری مبتنی بر سیلیکون هستند [۱۰-۳].

در سال ۲۰۱۳، قدردان و همکارش ساختاری را ارائه دادند که می‌توان از آن برای گیت‌های منطقی AND و XOR استفاده کرد [۱۱]. نسبت توان خروجی به ورودی در حالت "۱" منطقی از ۰/۸۱ تا ۱/۹ تغییر می‌کند که این اختلاف بالا از معایب ساختار محسوب می‌شود. مقدار نسبت کنتراست برابر با ۵/۶۶ است. برای طراحی ساختار از دو ماده برای جنس میله‌های دی‌الکتریکی استفاده شده است که باعث پیچیدگی ساختار و سخت شدن پیاده‌سازی آن می‌شود. زمان تأخیر در این ساختار برابر با ۱/۳۴ ps است که این به دلیل استفاده از تشدیدگر حلقوی در طراحی ساختار است. یونیس و همکاران در مقاله‌ای که در

امروزه با توجه به افزایش حجم داده‌ها و نیاز به سرعت پردازش بالاتر، پردازشگرهای نوری بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به منظور تحقق پردازش‌های تمام نوری در سرعت‌های ترابیت بر ثانیه لازم است افزاره‌های تمام نوری جایگزین افزاره‌های الکترونی شوند [۱-۲]. این افزاره‌ها شامل انواع فیلترها [۳]، حسگرها [۴]، مالتی‌پلکسرها و دی‌مالتی‌پلکسرها [۵]، گیت‌های منطقی [۶] و سایر افزاره‌ها تمام نوری هستند. طراحی گیت‌های منطقی تمام نوری در این میان اهمیت بالایی دارد. این گیت‌ها تا به حال بر بسترهای زیادی طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند.

بلورهای فوتونی با توجه به خصوصیتی که دارند می‌توانند جهت طراحی و پیاده‌سازی افزاره‌های تمام‌نوری مورد استفاده قرار بگیرند [۳-۶]. در بلورهای فوتونی دو بعدی ضریب شکست محیط به طور متناوب در دو راستا در حال تغییر است. یکی از خواص مهم شبکه‌های بلور فوتونی دارا بودن شکاف باند فوتونی است. شکاف باند فوتونی محدوده‌ای از طول موج‌ها است که اجازه

گیت‌های منطقی مبتنی بر بلور فوتونی و پارامترهای مهم در بررسی کارایی آن‌ها بیان شده است. در قسمت سوم ساختار کلی گیت منطقی AND تمام نوری و توضیحات مربوط به محاسبه شکاف باند مطرح شده است. در بخش چهارم مقاله نتایج شبیه‌سازی ساختار با نرم‌افزار Rsoft نشان داده شده و عملکرد گیت منطقی AND بررسی شده است. در بخش پنجم بررسی‌های صورت گرفته برای انتخاب شعاع نانو تشدیدگر آورده شده است.

## ۲- کلیات گیت‌های منطقی مبتنی بر بلور فوتونی

تا به حال گیت‌های منطقی مبتنی بر بلور فوتونی مختلفی ارائه شده است. در ادامه در دو بخش مجزا سازوکارهای مهم در طراحی این‌گونه گیت‌های منطقی و پارامترهای مهم در بررسی کارایی آن‌ها آورده شده است.

### ۲-۱- سازوکار گیت‌های منطقی بلور فوتونی

سازوکارهای اصلی استفاده شده در گیت‌های منطقی مبتنی بر بلور فوتونی به‌طور کلی مبتنی بر سه روش است. الف- اثر تداخل در ساختار بلورهای فوتونی، ب- به‌کارگیری مواد دارای اثر غیرخطی در ساختارهای تشدیدگرها، ج- اثر خودتوازی در بلورهای فوتونی.

در روش اول از تداخل سازنده و مخرب در کنترل نور استفاده می‌شود [۲۰-۱۶]. اگر اختلاف فاز بین دو پرتوی نوری ضریب زوجی از  $\pi$  باشد دو پرتو با هم تداخل سازنده خواهند داشت. در نتیجه به خروجی شدت نوری بالایی می‌رسد که برابر با سطح منطقی "۱" در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که اختلاف فاز بین دو پرتوی نوری ضریب فردی از  $\pi$  باشد، دو پرتو با هم تداخل غیرسازنده خواهند داشت. در این حالت در خروجی شدت نور به شدت کاهش می‌یابد که برابر با سطح منطقی "۰" در نظر گرفته می‌شود [۱۷-۱۶]. در بعضی از گیت‌های منطقی مبتنی بر اثر تداخل از شیفت‌دهنده‌های خارجی برای ایجاد اختلاف فاز استفاده شده است [۱۹-۱۸]. استفاده از این شیفت‌دهنده‌ها خارجی باعث افزایش ابعاد مورد نیاز برای گیت منطقی می‌شود که مطلوب نیست. در بعضی دیگر اختلاف فاز در داخل ساختار و با توجه به تفاوت در تعداد ردیف‌های هر کدام از موج‌برها یا با استفاده از نانو تشدیدگرها به‌وجود می‌آید [۲۰]. در این روش بیشتر از نانو تشدیدگرهایی استفاده می‌شود که با حذف یا با تغییر اندازه میله‌ها شکل گرفته‌اند. مزیت اصلی این روش سرعت عملکرد بالا و توان مصرفی پایین است.

در روش دوم که بیشتر مبتنی بر حلقه‌های تشدیدگر طراحی

سال ۲۰۱۴ چاپ شد، دو گیت منطقی AND و OR را ارائه کردند [۱۲]. ساختار این دو گیت ترکیبی از تشدیدگر حلقوی و نقص خطی Y شکل است. نرخ انتقال داده در این دو گیت به ترتیب برابر با  $0.2/0.8$  Tb/s و  $0.5/0.5$  Tb/s است. نسبت کنتراست برای گیت منطقی AND برابر با ۶ dB است. در این گیت توان نوری بیشتر از ۸۰ درصد توان ورودی برابر با سطح منطقی "۱" و کم‌تر از ۴۰ درصد ورودی برابر با "۰" منطقی در نظر گرفته شده است.

دسوزا و همکارانش در سال ۲۰۱۶ ساختاری برای مدارات منطقی از جمله AND را طراحی نمودند [۱۳]. این گیت مبتنی بر اثر تداخل و با استفاده از تشدیدگر حلقوی است. سادگی ساختار طراحی شده و اندازه کوچک آن امکان استفاده از این ساختار در مدارات مجتمع نوری را ممکن می‌کند اما عیب این ساختار در این است که در طول موج  $1550$  nm کار نمی‌کند. در سال ۲۰۱۷ پرن‌دین و کارخانه‌چی ساختاری را برای دو گیت منطقی NOR و AND مبتنی بر اثر تداخل ارائه دادند [۱۴]. اختلاف فاز در این ساختار به‌وسیله چهار نانو تشدیدگر موجود در ساختار حاصل می‌شود. در ساختار طراحی شده یک پایه به‌عنوان سیگنال کنترلی قرار داده شده است که با فعال بودن آن ساختار به‌عنوان گیت AND عمل خواهد کرد. اندازه کوچک این ساختار از مزایای ساختار به حساب می‌آید. شدت خروجی برای حالت "۱" منطقی برابر با ۷۷ درصد و برای حالت "۰" کمتر از ۱۸٪ توان ورودی است. زمان پاسخ این گیت به سیگنال ورودی برابر با  $0.65$  ps است. در سال ۲۰۱۸، ساختاری برای گیت منطقی AND ارائه شد که مبتنی بر اثر تداخل کار می‌کند [۱۵]. اختلاف فاز بین دو موج‌بر اساس اختلاف طول موج‌بر در ساختار حاصل شده است. شدت توان نوری خروجی در حالت یک منطقی نسبت به توان ورودی برابر با  $1/0.05$  و در حالت صفر منطقی برابر با  $0.251$  است که نسبت کنتراست گیت منطقی برابر با  $6/0.2$  dB خواهد بود.

در این مقاله، یک گیت منطقی AND تمام نوری مبتنی بر نانو تشدیدگر بلور فوتونی طراحی شده است. نانو تشدیدگر بلور فوتونی پیشنهاد شده بسیار ساده بوده و با افزایش اندازه شعاع یک میله دی الکتریک شکل گرفته است. روش‌های تفاضل متناهی در حوزه زمان و بسط امواج تخت برای تحلیل ساختار استفاده شده‌اند. نسبت کنتراست قابل قبول، زمان تأخیر بسیار کم، سرعت عملیاتی بسیار بالا، اندازه کوچک، و سادگی ساختار از ویژگی‌های مهم ساختار ارائه شده هستند.

در قسمت دوم مقاله، انواع سازوکارهای موجود در طراحی

اطلاعات در سرعت بالاتری را ممکن می‌کند. بسته به این‌که از چه نوع تشدیدگری برای طراحی استفاده شود، میزان زمان پاسخ به سیگنال ورودی متفاوت خواهد شد. اگر از تشدیدگرهای حلقوی استفاده شود زمان تأخیر گیت‌های منطقی بیشتر از حالتی خواهد بود که از نانو تشدیدگرها استفاده شود. در حالتی که مدار منطقی مبتنی بر نانو تشدیدگر طراحی شود زمان تأخیر در حدود چند دهم ps است که نرخ ارسال اطلاعاتی برابر با چند ترابایت بر ثانیه را در پی خواهد داشت. برای محاسبه زمان پاسخ مدت زمان رسیدن توان نوری خروجی از مقدار صفر به % ۹۰ مقدار نهایی را محاسبه می‌کنیم. به‌طور معمول در گیت‌های منطقی میزان زمان صعود نسبت به زمان فرود بیشتر است. بنابراین در بیشتر مقالات زمان صعود گیت منطقی طراحی شده به‌عنوان زمان پاسخ گیت منطقی بیان می‌شود [۲۵].

پارامتر بعدی میزان شدت توان خروجی است. با توجه به استفاده گیت‌ها در مدارات پیشرفته‌تر و تحقق پردازشگرهای نوری، متوالی بستن این گیت‌ها امری حتمی است. بنابراین، اگر شدت خروجی از یک میزان کمتر باشد، گیت بعدی کارایی خود را از دست خواهد داد. نکته مهم دیگر در مورد شدت خروجی عدم تفاوت در میزان این مقدار در حالت‌های مختلف است. برای مثال نباید برای سطح منطقی "۱"، در یک حالت شدت خروجی ۸۰٪ و در حالت دیگر ۱۹۰٪ سیگنال ورودی داشته باشد، این تفاوت در مقدار شدت خروجی باعث ایجاد خطای تشخیص در گیت منطقی خواهد شد [۲۶-۲۷]. چرا که خروجی گیت منطقی باید هر دو مقدار را به‌عنوان "۱" در نظر بگیرد.

تحلیل و بررسی‌ها با استفاده از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان و بسط امواج تخت صورت گرفته است. روش بسط امواج تخت برای به‌دست آوردن شکاف باند فوتونی به‌کار گرفته و روش تفاضل متناهی در حوزه زمان برای بررسی رفتار میدان الکترومغناطیس و محاسبه توزیع میدان الکتریکی در ساختار بلور فوتونی استفاده شده است. شبیه‌سازی در دو بعد صورت گرفته است و اندازه مش‌بندی ساختار  $\Delta x = \Delta y = \lambda/16$  در نظر گرفته شده است، که در آن  $\lambda$  طول موج فضای آزاد و برابر با ۱۵۵۰ nm است. بنابراین، با استفاده از فرمول زیر پله‌های زمانی شبیه‌سازی برابر  $\Delta t$  است [۲۸-۳۰].

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2} \quad (2)$$

### ۳- ساختار کلی و محاسبه شکاف باند

ساختار بلور فوتونی استفاده شده، آرایه‌ای  $19 \times 19$  از میله‌های دی‌الکتریک قرار گرفته در بستر هوا است. جنس دی‌الکتریک به‌کار رفته از سیلیکون است. استفاده از سیلیکون امکان استفاده

می‌شوند، از مواد غیرخطی در قسمتی از ساختار استفاده می‌شود [۲۱-۲۲]. استفاده از مواد غیرخطی و اثر اپتیکی کر باعث می‌شود که در ساختار به نرخ وضوح بالا دست پیدا کرد، ولی نقطه ضعف این طراحی‌ها توان راه‌اندازی و مصرفی بالا است. دلیل این امر برهم‌کنش ضعیف بین نور و ماده در ساختارهای حلقه‌های تشدیدگر بلور فوتونی است و از طرفی مواد غیرخطی برای تغییر ضریب شکست نیاز به توان بالایی از نور دارند، که این امر نیز موجب توان راه‌اندازی بالایی برای گیت طراحی شده با این مواد می‌شود [۱۱]. از طرفی ساختار گیت‌ها پیچیده‌تر می‌شوند. همچنین سرعت عملکرد به دلیل زمان لازم جهت پاسخ مواد غیرخطی کم می‌شود.

در روش سوم از یک ویژگی منحصر به فرد بلورهای فوتونی به نام اثر خودتوازی استفاده می‌شود. اثر خودتوازی این است که در محدوده‌ای از طول‌موج‌ها، نور تابشی بدون هیچ‌گونه پراش، در داخل ساختار و در جهت معینی طی مسیر می‌نماید. در روش سوم از این اثر برای انتقال نور از ورودی به خروجی و طراحی ادوات نوری استفاده می‌شود. این اثر مستقل از توان نور تابشی است و در توان‌های کم نیز ایجاد می‌شود، اما کنترل پراکندگی نور در ساختار به سختی صورت می‌گیرد که استفاده از این اثر را کمتر کرده است [۲۳].

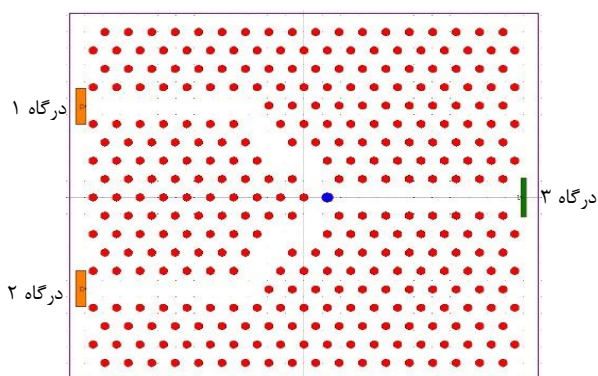
### ۲-۲- پارامترهای مهم در بررسی کارایی گیت‌های منطقی نوری

کارایی گیت‌های منطقی نوری توسط چند پارامتر بررسی و مقایسه می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در بررسی کارایی گیت‌های منطقی نسبت کنتراست است. این پارامتر تمایز بین سطح منطقی "۱" و "۰" را نشان می‌دهد [۲۴]. هر چه اختلاف توان در دو حالت "۱" و "۰" منطقی بیشتر باشد این نسبت بزرگ‌تر بوده و عملکرد دروازه منطقی بهتر خواهد بود. این پارامتر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CR = 10 \times \log \left[ \frac{P_{on}}{P_{off}} \right] \quad (1)$$

که در آن،  $P_{on}$  مقدار توان نوری برای منطق "۱" بوده و  $P_{off}$  توان نوری برای منطق "۰" است. با توجه به این‌که منطق "۱" و "۰" ممکن است برای حالت‌های مختلف دارای مقادیر متفاوت باشد، در محاسبه نسبت کنتراست برای حالت  $P_{on}$  کم‌ترین مقدار و برای  $P_{off}$  بیشترین مقدار آن در نظر گرفته می‌شود. یعنی این نسبت در بدترین شرایط هر خروجی محاسبه می‌شود.

پارامتر دیگر برای بررسی گیت‌های منطقی نوری زمان پاسخ گیت منطقی به سیگنال ورودی است که خود عاملی در سرعت انتقال بیت آن دروازه است. این پارامتر هر چه کم‌تر باشد ارسال



شکل (۲): ساختار طراحی شده برای گیت منطقی AND. ساختار از سه موجبر تشکیل شده است که توسط یک نانو تشدیدگر به هم متصل شده‌اند.

علاوه بر این امکان طراحی ساختارهای ساده‌تر را نیز ممکن می‌سازد. نانو تشدیدگر استفاده شده در طراحی این گیت منطقی AND تمام نوری باعث خواهد شد، زمان تأخیر در گیت نسبت به گیت‌های منطقی مبتنی بر حلقه‌های تشدیدگر کاهش یافته و نرخ ارسال اطلاعات بالا رود. نرخ ارسال اطلاعات در گیت‌های طراحی شده با تشدیدگرهای حلقوی در حد چندصد GB/s است در حالی که این مقدار برای گیت‌های طراحی شده با نانو تشدیدگرها در حد چند ترا بیت بر ثانیه است. در صورتی که سطح توان نوری دریافت شده در خروجی به میزان قابل قبول باشد، خروجی در سطح منطقی یک و در صورتی که توان نوری خروجی بسیار پایین باشد، سطح منطقی خروجی برابر با صفر خواهد بود.

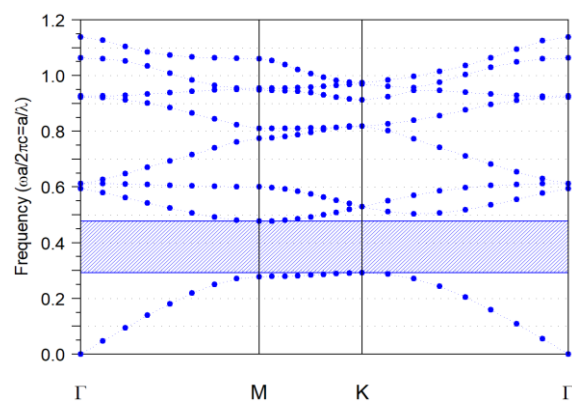
#### ۴- بررسی عملکرد گیت منطقی

برای بررسی درستی عملکرد گیت در ابتدای درگاه‌های ۱ و ۲ یک منبع نور قرار داده شده است. در خروجی هم یک مانیتور برای دریافت نور خروجی قرار داده شده است. با توجه به جدول صحت مربوط به گیت منطقی AND، عملکرد گیت در سه حالت بررسی شده است. در حالت اول منبع قرار داده شده در درگاه ۱ فعال و منبع قرار داده شده در درگاه ۲ غیرفعال است. در این حالت قسمت اصلی نور در نانو تشدیدگر بازتاب داده می‌شود. بخشی از موج ورودی به موجبر دیگر انتقال داده شده و قسمت کمی از نور به خروجی می‌رسد. میدان الکترومغناطیس مربوط به این حالت در شکل (۳-الف) آورده شده است. در حالت دوم منبع نوری قرار داده شده در درگاه ۲ فعال می‌شود. در این حالت نیز نور در نانو تشدیدگر بازتاب داده شده و بخش ناچیزی از نور ورودی به درگاه ۳ می‌رسد. میدان الکترومغناطیس مربوط به این حالت در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. در این دو حالت می‌توان توان نوری خروجی را برابر با سطح منطقی صفر در نظر گرفت. میزان توان نوری دریافت شده در خروجی در این دو

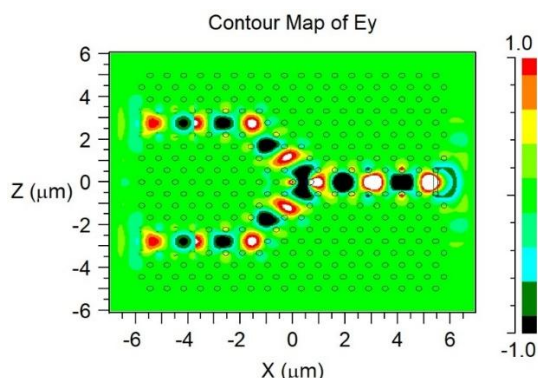
از فناوری CMOS برای ساخت را افزایش می‌دهد و گیت طراحی شده را با سایر ادواتی که با این فناوری ساخته شده‌اند، سازگار می‌کند. همچنین سیلیکون محدود عملیاتی حرارتی وسیعی دارد و تغییرات جزئی دما در عملکرد آن تأثیر ناچیزی دارد. ثابت شبکه و شعاع میله‌ای سیلیکونی به ترتیب برابر با ۶۴۰ nm و ۱۱۵ nm است. انتخاب این اندازه‌ها با توجه به این نکته است که قرار است ساختار دارای شکاف باندها در محدوده ۱۵۵۰ nm باشد.

این ساختار برای TM شکاف باندها نداشته و شکاف باندها در TE معادل با طول موج‌های (۲۱۴۵-۱۳۱۹ nm) است که این شکاف باندها وسیع به دلیل استفاده از سیلیکون به عنوان دی‌الکتریک است. شکاف باندها در TE در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل (۲) گیت منطقی AND تمام نوری طراحی شده نشان داده شده است. برای طراحی این گیت از سه موجبر استفاده شده است. دو موجبر به عنوان موجبر ورودی و یک موجبر به عنوان موجبر خروجی قرار داده شده است. هر کدام از موجبرهای ورودی با حذف ۱۲ عدد و موجبر خروجی با حذف ۸ عدد از میله‌های دی‌الکتریک طراحی شده است. یک نانو تشدیدگر که با افزایش اندازه میله دی‌الکتریک شکل گرفته است، این سه موجبر را به هم متصل کرده است. درگاه‌های یک و دو برای اعمال سیگنال‌های ورودی انتخاب شده‌اند. سیگنال خروجی از درگاه ۳ دریافت می‌شود. گیت منطقی طراحی شده مبتنی بر سازوکار اثر تداخل در بلورهای فوتونی است. استفاده از سازوکار اثر تداخل در مقایسه با دو سازوکار دیگر، نیاز ساختار به توان مصرفی را به شدت پایین می‌آورد. توان مصرفی برای گیت‌های منطقی طراحی شده با اثر تداخل در حد چند میلی وات بر میکرومتر مربع است در حالی که این مقدار برای گیت‌های طراحی شده با استفاده از مواد غیرخطی در حد چند صد وات بر میکرومتر مربع است.



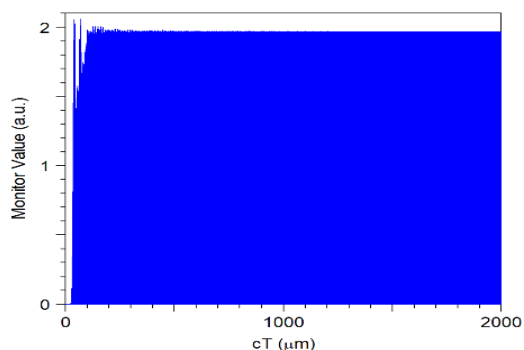
شکل (۱): شکاف باندها فوتونی برای ساختار بلور فوتونی استفاده شده در TE مود



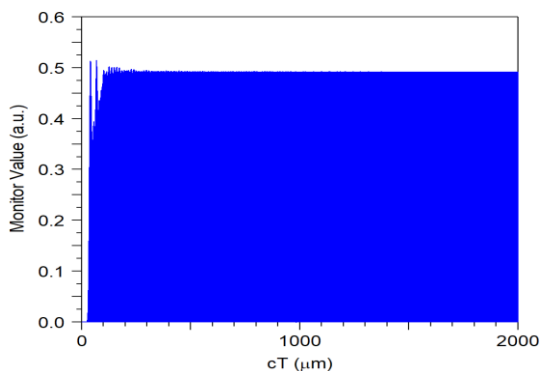
شکل (۴): رفتار میدان الکترومغناطیس در گیت منطقی AND برای حالتی که هر دو ورودی بالا و پایین فعال هستند.

جدول (۱): جدول صحت برای گیت منطقی AND تمام نوری

ورودی اول		ورودی دوم		خروجی	
مقدار منطقی	توان نوری	مقدار منطقی	توان نوری	مقدار منطقی	توان نوری
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۱	$P_{in}$	۰	$0.492 P_{in}$
۱	$P_{in}$	۰	۰	۰	$0.492 P_{in}$
۱	$P_{in}$	۱	$P_{in}$	۱	$1/968 P_{in}$



الف

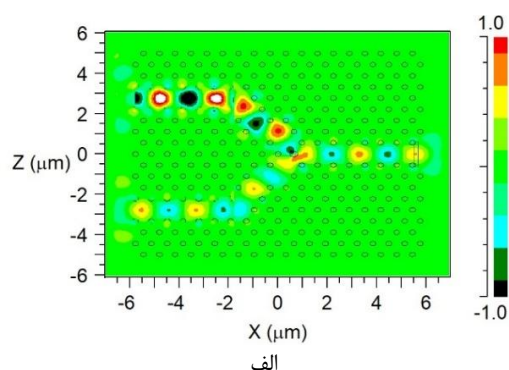


ب

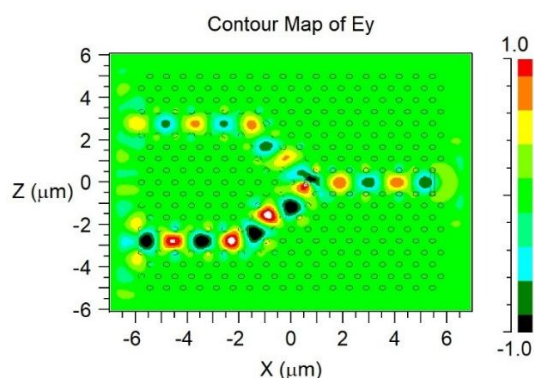
شکل (۵): نمودار شدت توان خروجی برای گیت منطقی AND طراحی شده در دو حالت ممکن برای خروجی، الف) خروجی در حالت یک منطقی، ب) خروجی در حالت صفر منطقی

حالت برابر با  $0.492$  توان ورودی است. در حالت سوم، هر دو منبع نوری فعال هستند. نور وارد شده از دو درگاه ورودی در تشدیدگر با هم ادغام شده و نوری با توان بالا به خروجی می‌رسد. شکل (۴) رفتار میدان الکترومغناطیس موجود در ساختار در این حالت را نشان می‌دهد. توان نوری خروجی در این حالت  $1/968$  توان نوری است که برابر با سطح منطقی یک در نظر گرفته می‌شود.

فاصله بین سطح منطقی یک و صفر در خروجی با پارامتر نسبت کنتراست بیان می‌شود. این پارامتر در قسمت ۲-۱ تعریف شده است. با توجه به این که کمینه توان نوری دریافت شده در حالت یک برابر با  $1/968$  و بیشینه توان نوری در حالت برابر با سطح منطقی صفر  $0.492$  است، میزان نسبت کنتراست برای گیت طراحی شده برابر با  $6$  dB است. از طرفی با توجه به شدت خروجی حاصل شده در این گیت منطقی به راحتی می‌توان نوری در دو حالت صفر و یک منطقی را از هم تمیز داد. توان نوری خروجی بالا، گیت منطقی را قادر می‌سازد گیت‌های منطقی طبقه بعدی را فعال سازد و در مدارات مجتمع قرار گیرد. در جدول (۱) جدول صحت و میزان توان نوری خروجی در هر حالت بیان شده است.



الف



ب

شکل (۳). رفتار میدان الکترومغناطیس در ساختار متناسب با حالت‌های مختلف ورودی در گیت منطقی AND، الف) ورودی بالا فعال و ورودی پایین غیرفعال است، ب) ورودی بالا غیرفعال و ورودی پایین فعال است.

شده مبتنی بر اثر تداخل بوده و با استفاده از نانو تشدیدگر بلور فوتونی طراحی شده است. نسبت کنتراست در مقدار قابل قبول و زمان تأخیر آن اندک است. زمان تأخیر برابر با ۰/۳۲ ps است که این گیت را برای استفاده در ادوات انتقال اطلاعات با سرعت بالا مناسب می‌سازد. مزیت دیگر این ساختار اندازه کوچک آن است که برابر با  $210 \mu\text{m}^2$  است. علاوه بر این میزان شدت توان نوری در خروجی در حالت یک منطقی برابر با ۱/۹۶۸ برابر توان ورودی است که در سطح بالایی قرار دارد و این امکان را فراهم می‌سازد که از این گیت منطقی در وروی سایر مدارات منطقی نوری استفاده شود. با توجه به ویژگی‌های گیت منطقی طراحی شده، این گیت برای استفاده در مدارات مجتمع نوری مناسب خواهد بود.

**جدول (۲):** میزان توان نوری خروجی در دو حالت یک و صفر منطقی به ازای مقادیر مختلف برای شعاع نانو تشدیدگر در حالت کاهش اندازه شعاع

توان نوری خروجی در حالت صفر منطقی	توان نوری خروجی در حالت یک منطقی	نسبت شعاع نانو تشدیدگر به شعاع میله‌ها
۰/۲۷۵	۱/۰۷	۰/۴۲
۰/۲۲۲	۰/۸۹۶	۰/۵۰
۰/۱۸۳	۰/۷۳۳	۰/۵۸
۰/۱۵۲	۰/۶۱۵	۰/۶۶
۰/۱۲۷	۰/۵۱۳	۰/۷۰
۰/۱۰۹	۰/۴۴۲	۰/۸۲

**جدول (۳):** میزان توان نوری خروجی در دو حالت یک و صفر منطقی به ازای مقادیر مختلف برای شعاع نانو تشدیدگر در حالت افزایش اندازه شعاع

توان نوری خروجی در حالت صفر منطقی	توان نوری خروجی در حالت یک منطقی	نسبت شعاع نانو تشدیدگر به شعاع میله‌ها
۰/۲۸۵	۱/۰۸۱	۱/۱۵
۰/۳۵۳	۱/۴۱۳	۱/۲۰
۰/۴۱۲	۱/۶۲۸	۱/۲۵
۰/۴۹۲	۱/۹۶۸	۱/۳۰
۰/۴۱۹	۱/۶۱۶	۱/۳۵
۰/۳۴۱	۱/۳۵۹	۱/۴۰

## ۷- مراجع

- [1] A. Mohebzadeh-Bahabady, S. Olyaei, "Designing low power and high contrast ratio all-optical not logic gate and investigating its use in optical integrated circuits," Optical and Quantum Electronics, Vol. 51, No. 3, pp. 1-13, 2019.

با مقایسه نور ورودی و خروجی در حالت‌های مختلف می‌توان زمان تأخیر را برای گیت منطقی AND تمام نوری طراحی شده به دست آورد. شکل (۵) نمودار توان نوری خروجی بر حسب زمان را در دو حالت خروجی (یک و صفر منطقی) نشان می‌دهد. در حالتی که سطح توان خروجی صفر است به اندازه  $cT=66 \mu\text{m}$  طول می‌کشد تا موج خروجی به اندازه مطلوب برسد. با توجه به سرعت نور، زمان تأخیر در این حالت برابر با ۰/۲۲ ps محاسبه می‌شود. در حالتی که خروجی در سطح منطقی یک است به اندازه  $cT=96 \mu\text{m}$  طی می‌شود تا خروجی در سطح مطلوب قرار گیرد. در نتیجه زمان تأخیر در این حالت برابر با ۰/۳۲ ps است. بنابراین در بیشترین میزان، زمان تأخیر مربوط به این گیت منطقی ۰/۳۲ ps خواهد بود که نرخ انتقال داده در گیت پیشنهادی برابر با ۳/۱۲۵ Tb/s می‌شود.

## ۵- بهبود در ساختار

برای پیدا کردن اندازه مناسب برای نانو تشدیدگر اندازه این میله دی‌الکتریک در دو بازه تغییر داده شد و در هر کدام از حالت‌ها عملکرد گیت منطقی AND مورد بررسی قرار گرفت.

بازه اول برای حالتی است که نانو تشدیدگر با کاهش اندازه شعاع میله شکل بگیرد. در جدول (۲) خروجی گیت منطقی در دو حالتی که توان خروجی برابر با سطح منطقی یک و سطح منقی صفر است، آورده شده است. در تمامی این حالت‌ها اندازه نسبت کنتراست در حدود ۶ dB است.

بازه دوم در حالتی در نظر گرفته شده است که نانو تشدیدگر با افزایش شعاع میله دی‌الکتریک شکل گرفته باشد. در این حالت شعاع نانو تشدیدگر با نسبت‌های مشخص افزایش یافته است و در هر حالت خروجی ساختار اندازه‌گیری شده است. مقادیر توان نوری خروجی در دو حالت برابر با یک و صفر منطقی در جدول (۳) آورده شده است. در این حالت‌ها نیز تقریباً نسبت کنتراست در همه حالت‌ها یکسان است. از آنجایی که میزان توان خروجی در حالت‌های مختلف به خصوص در حالت یک منطقی نیز برای بررسی کارایی ساختار نیز مهم است، نسبت اندازه شعاع نانو تشدیدگر به اندازه شعاع میله‌ها برابر با ۱/۳ انتخاب شده است. در این حالت خروجی در حالت یک مقدار ۱/۹۶۸ را دارد که در مقایسه با سایر موارد توان خروجی بالاتری است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک گیت منطقی AND تمام نوری مبتنی بر نانو تشدیدگر بلور فوتونی پیشنهاد شد. ساختار از سه موج‌بر و یک نانو تشدیدگر تشکیل شده است. سازوکار گیت منطقی طراحی

- [17] P. Rani, Y. Kalra, R.K. Sinha, "Design and analysis of polarization independent all optical logic gates in silicon-on-insulator photonic crystal," *Optics Communications*, Vol. 374, pp. 148-155, 2016.
- [18] P. Rani, S. Fatima, Y. Kalra, R. K. Sinha, "Realization of all optical logic gates using universal NAND gates on photonic crystal platform," *Superlattices and Microstructures*, Vol. 129, pp. 619-625, 2017.
- [19] E. Shaik, N. Rangaswamy, "Realization of XNOR logic function with all-optical high contrast XOR and NOT gates," *Opto-Electronics Review*, Vol. 26, pp. 63-72, 2018.
- [20] M. Hussein, A. Tamer, N. Rafat, "A review on the techniques for building all-optical photonic crystal logic gates," *Optics and Laser Technology*, Vol. 106, pp. 385-397, 2018.
- [21] S. Afzal, V. Ahmadi, M. Ebnali-Heidari, "All-optical tunable photonic crystal NOR gate based on the nonlinear Kerr effect in a silicon nanocavity," *Journal of Optical Society America B*, Vol. 30, No. 9, pp. 2535-2539, 2013.
- [22] Z. Mohebbi, N. Nozhat, M. Khodadadi, "All-optical simultaneous AND & XOR logic gates based on nonlinear micro-ring resonator," *Journal of Modern Optics*, Vol. 65, No. 21, pp. 2326-2331, 2018.
- [23] Y. C. Jiang, S. B. Liu, H. F. Zhang, X. K. Kong, "Realization of all optical half-adder based on self-collimated beams by two-dimensional photonic crystals," *Optics Communications*, Vol. 348, pp. 90-94, 2015.
- [24] A. Mohebzadeh-Bahabady, S. Olyaei, "All-optical NOT and XOR logic gates using a photonic crystal nano-resonator and based on interference effect," *IET Optoelectronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 191-195, 2018.
- [25] E. H. Shaik, N. Rangaswamy, "Single photonic crystal structure for realization of NAND and NOR logic functions by cascading basic gates," *Journal of Computational Electronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 337-348, 2018.
- [26] Q. Liu, Z. Ouyang, C. Jung Wu, C. P. Liu, J. C. Wang, "All-optical half adder based on cross structures in two-dimensional photonic crystals," *Optics Express*, Vol. 16, No. 23, pp. 18992-19000, 2008.
- [27] M. Seifouri, S. Olyaei, M. Sardari, A. Mohebzadeh-Bahabady, "Ultra-fast and compact all-optical half adder using 2D photonic crystals," *IET Optoelectronics*, Vol. 13, No. 3, pp. 139-143, 2019.
- [28] M. Seifouri, V. Fallahi, S. Olyaei, "Ultra-high-Q optical filter based on photonic crystal ring resonator," *Photonic Network Communications*, Vol. 35, No. 2, pp. 225-230, 2018.
- [29] A. Seyedfaraji and V. Ahmadi, "Improvement of hybrid photonic crystal Raman amplifier using optofluidic materials," *Journal of Applied Electromagnetics*, Vol. 4, No. 3, pp. 56-64, 2016 (in Persian).
- [30] S. Olyaei, M. Seifouri, A. Mohebzadeh-Bahabady, M. Sardari, "Realization of all-optical NOT and XOR logic gates based on interference effect with high contrast ratio and ultra-compact size," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 50, No. 11, pp. 1-12, 2018.
- [2] S. C. Xavier, B. E. Carolin, A. P. Kabilan, W. Johnson, "Compact photonic crystal integrated circuit for all-optical logic operation," *IET Optoelectronics*, Vol. 10, No. 4, pp. 142-147, 2016.
- [3] M. Mansouri-Birjandi, M. Ghadrán, "Full-optical tunable add/drop filter based on nonlinear photonic crystal ring resonators," *Photonic and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, Vol. 21, pp. 44-51, 2016.
- [4] S. Olyaei, A. Mohebzadeh-Bahabady, "Designing a novel photonic crystal nano-ring resonator for biosensor application," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 47, No. 7, pp. 1881-1888, 2015.
- [5] H. Alipour-Banaei, S. Serajmohammadi, F. Mehdizadeh, "Effect of scattering rods in the frequency response of photonic crystal demultiplexers," *Journal of Optoelectronics Advanced Materials*, Vol. 17, No. 3-4, pp. 259-263, 2015.
- [6] F. Mehdizadeh, M. Soroosh, H. Alipour-Banaei, "A proposal for 4-to-2 optical encoder based on photonic crystals," *IET Optoelectronics*, Vol. 11, No. 1, pp. 29-35, 2017.
- [7] F. Parandin, R. Malmir, M. Naseri, A. Zahedi, "Reconfigurable all-optical NOT, XOR, and NOR logic gates based on two dimensional photonic crystals," *Superlattices and Microstructures*, Vol. 113, pp. 737-744, 2018.
- [8] Y. C. Ghadrán, S. B. Liua, H. F. Zhanga, X. K. Konga, "Reconfigurable design of logic gates based on a two-dimensional photonic crystals waveguide structure," *Optics Communications*, Vol. 332, pp. 359-3653, 2014.
- [9] T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nature Photonics*, Vol. 2, no. 8, pp. 465-473, 2008.
- [10] J. Ma, C. Jiang, "Demonstration of Ultraslow Modes in Asymmetric Line-Defect Photonic Crystal Waveguides," *IEEE Photonic Technology Letters*, Vol. 20, pp. 1237-1239, 2008.
- [11] M. Ghadrán, A. Mansouri-Birjandi, "Concurrent implementation of all-optical half-adder and AND & XOR logic gates based on nonlinear photonic crystal," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 45, pp. 1027-1036, 2013.
- [12] R. M. Younis, N. F. F. Areed, S. S. A. Obayya, "Fully Integrated AND and OR Optical Logic Gates," *IEEE Photonic Technology Letters*, Vol. 26, No. 19, 2014.
- [13] N. M. D'souza, V. Mathew, "Interference based square lattice photonic crystal logic gates working with different wavelengths," *Optics and Laser Technology*, Vol. 80, pp. 214-219, 2016.
- [14] F. Parandin, M.M. Karkhanehchi, "Terahertz all-optical NOR and AND logic gates based on 2D photonic crystals," *Superlattices and Microstructures*, Vol. 101, pp. 253-260, 2017.
- [15] M. Hussein, A. Tamer, N. Rafat, "New designs of a complete set of photonic crystals logic gates," *Optics Communications*, Vol. 411, pp. 175-181, 2018.
- [16] K. Goudarzi, A. Mir, I. Chaharmahali, D. Goudarzi, "All-optical XOR and OR logic gates based on line and point defects in 2-D photonic crystal," *Optics and Laser Technology*, Vol. 78, pp. 139-142, 2016.

## **Design of an All-Optical AND Logic Gate based on Photonic Crystal with Small Dimensions Suitable for Integrated Optical Circuits**

**A. Mohebzadeh Bahabadi, S. Olyaei \***

**Shahid Rajaei Teacher Training University**

(Received: 04/11/2018, Accepted: 05/03/2019)

### **Abstract**

*In this paper, using a two-dimensional photonic crystal, a compact and simple structure is introduced for an all-optical AND logic gate. The designed structure consists of three photonic crystal waveguides connected by a nano resonator. The nano resonator is formed by increasing the radius of the dielectric rod. Analysis and investigations have been done using the finite-difference time-domain and plane wave expansion methods. The plane wave expansion method is used to obtain photonic band gap and finite-difference time-domain method is used to study the electromagnetic field behavior in photonic crystal structure. The advantages of this design are small dimensions, the high possibility of realization, compatibility with silicone technology and high output power in logical state of 1. The delay time of this gate is 0.32 ps. The minimum ratio of the received optical power to the input power in logical state of 1, is 1.968 and the maximum ratio of the optical power to the input power in logic zero mode is 0.492. So, the contrast ratio for the designed logic gate is 6 dB. The high output power allows the logic gate to enable the next level logic gates and to be integrated into optical integrated circuits. Considering the features mentioned, this logic gate can be used in optical integrated circuits.*

**Keywords:** All-optical logic gate, nano resonator, optical integrated circuits, interference effect, contrast ratio, response

---

\* Corresponding author E-mail: s\_olyaei@sru.ac.ir