

مدلسازی عددی گیت منطقی فردکین مبتنی بر بلور نوری و اثرات غیر خطی در محدوده طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر

علی فرمانی^۱ رضا بیرانوند^۲

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه لرستان - لرستان- ایران

Farmani.a@lu.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه لرستان - لرستان- ایران

Beiranvand.re@fe.lu.ac.ir

چکیده: در این پژوهش به طراحی یک گیت فردکین تمام نوری در محدوده طول موج کاری ۱۵۵۰ نانومتر پرداخته ایم. ساختار پیشنهادی دارای ابعاد کوچک نسبت به تحقیقات ارزشمند گروه های تحقیقاتی پیشین می باشد. اساس اصلی این طراحی ایجاد حفره های هوایی بر بستر سیلیکون است. بستر سیلیکونی استفاده شده با شعاع ۴۶۶ نانومتر و حفره های هوایی ایجاد شده دارای ۱۷۷ نانومتر شعاع می باشند. جهت مدلسازی ساختار پیشنهادی روش حل عددی تفاضل محدود در حوزه زمان مورد استفاده قرار گرفته است. جهت بررسی استفاده اثر غیرخطی در مدل پیشنهادی، از یک حلقه غیر خطی از جنس گلس دوپ شده با ضریب شکست ۱,۴ و ضریب شکست غیر خطی $10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ استفاده شده است. جهت ارزیابی دقیق مدل پیشنهادی پارامترهای پاسخ زمانی و نرخ کنتراست بررسی شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد، بهترین زمان خیزش 0.21 ps و زمان افت 0.02 ps، و همچنین نرخ کنتراست 4.31 dB خواهد بود.

واژه های کلیدی: گیت فردکین، بلورهای فوتونی، اثرات غیر خطی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.1.97

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲

نام نویسنده ی مسئول: علی فرمانی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - لرستان - جاده کمالوند - دانشگاه لرستان - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک

۱- مقدمه

شد و کامپیوتر کوانتومی NMR دوکیوبیتی استفاده شده برای حل مشکل روش Deutsch (تمایز بین توابع ثابت و متوازن) نشان داده شد [۸]. هر گیت کوانتومی، یک تبدیل خطی است که با یک ماتریس واحد مؤثر بر فضای n کیوبیتی تعریف می‌گردد. از آنجاکه هر عمل یکانی، برگشت پذیر است، هر گیت کوانتومی نیز برگشت پذیر است. پس با داشتن خروجی‌های یک گیت کوانتومی، می‌توان ورودی‌های متناظر آن را به دست آورد و جدول درستی آن را نشان داد. برای انجام بعضی از محاسبات اغلب الزام است عملیات تغییر روی یک مجموعه از کیوبیت ها با توجه به مقادیری که مجموعه دیگری از کیوبیت ها دارند بکار ببریم. گیت‌هایی که این نوع عملیات را بکار می‌برند گیت‌های کنترلی نامیده می‌شوند. بر همین اساس گروه‌های تحقیقاتی بسیاری در این حوزه طراحی گیت‌های منطقی کوانتومی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۹].

در این مقاله یک طرح جدید از گیت فردکین تمام نوری بر مبنای فوتونیک بلوره شبیه‌سازی شده است. برای طراحی از یک بستر سیلیکونی با حفره‌های هوایی استفاده شده است. همین‌طور یک حلقه غیرخطی نیز به کار رفته است. یک حلقه غیرخطی یا حفره غیرخطی می‌تواند با اضافه کردن میله یا حفره‌های غیرخطی [۱۰، ۱۱] در داخل حلقه [۱۲، ۱۳] ایجاد شود. این میله‌های غیرخطی را می‌توان از مواد با ضریب بالای کر مانند شیشه دوپ شده [۱۴] یا چالکوچناید [۱۵] و یا از دی‌الکتریک‌های [۱۶] دوپ شده با نانو بلوره ایجاد کرد.

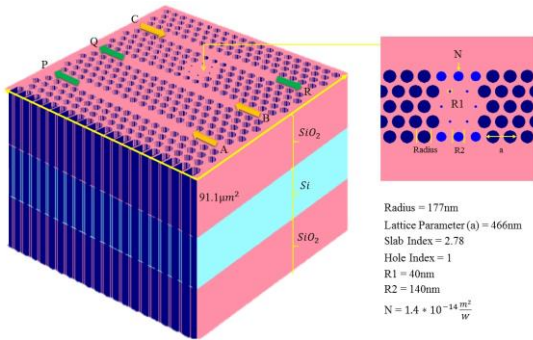
۲- ساختار پیشنهادی

گیت فردکین یک گیت جابجا کننده کنترلی است. این گیت جامع و تعمیم پذیر است. اگر A صفر باشد دو ورودی دیگر به صورت مستقیم به خروجی‌ها می‌روند. اگر A یک شود دو ورودی دیگر به صورت متقاطع به خروجی‌ها می‌روند و در واقع در این حالت گیت ورودی‌ها را جابجا می‌کند [۹]. جدول (۱) جدول صحت و شکل (۱) بلوک دیاگرام گیت فردکین را نشان می‌دهد.

جدول (۱): جدول صحت گیت فردکین

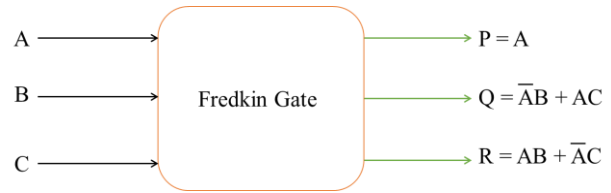
A	B	C	P	Q	R
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۱	۰	۰	۱
۰	۱	۰	۰	۱	۰
۰	۱	۱	۰	۱	۱
۱	۰	۰	۱	۰	۰
۱	۰	۱	۱	۱	۰
۱	۱	۰	۱	۰	۱
۱	۱	۱	۱	۱	۱

محاسبات و اطلاعات کوانتومی به‌عنوان یک زمینه و روش جدید و کارآمد پردازش اطلاعات بر اساس مکانیک کوانتومی است و دارای روند پیشرفت سریعی بوده است. از دهه ۱۹۷۰ تا اواسط دهه ۱۹۸۰ دستگاه محاسباتی بر اساس مکانیک کوانتومی توسط متخصصین در حوزه کامپیوتر، ریاضی و فیزیک از جمله یوری مانین، ریچارد فیمن، پل بنیوف، چارلز بنت و دیوید دوئیچ مطرح شد. علت ظهور و رشد محاسبات و اطلاعات کوانتومی، محدود شدن رشد فناوری مطابق با قانون مور بود. در مدارهای منطقی دو منبع شناخته شده‌ی تلفات توان، مصرف توان ایستا می‌باشند. در سال ۱۹۶۷، لان داور یکی از منابع از دست دادن انرژی در مدار منطقی را از دست دادن اطاعات معرفی کرد. او نشان داد که در مدارهایی که برگشت پذیر نیستند، هر بیتی از اطلاعات که تلف شود میزان $KT \ln 2$ ژول انرژی تولید خواهد کرد. در این رابطه K ثابت بولتزمن و T درجه حرارت در عملیات انجام شده است [۱]. در سال ۱۹۷۳، بنت نشان داد تا زمانی که سیستم به تولید مجدد ورودی‌ها از خروجی‌های مشاهده شده اجازه دهد یا به عبارت دیگر سیستم شامل گیت‌های برگشت پذیر باشد، انرژی $KT \ln 2$ از سیستم تلف نمی‌شود (تلفات انرژی مقدار ناچیزی خواهد بود) [۲]. در سال ۱۹۸۵ دوئیچ متوجه شد که اظهارات فیمن، می‌تواند تدریجاً به ساخت کامپیوتر کوانتومی منجر شود و مقاله‌ای را منتشر کرد مبنی بر اینکه اصول هر فرآیند فیزیکی را میتوان به خوبی با کامپیوترهای کوانتومی جامع مدل‌سازی کرد [۳]. بالاخره در سال ۱۹۹۴ پیترو شور مقاله‌ای را منتشر نمود که حاوی روشی برای استفاده از کامپیوترهای کوانتومی در حل مشکل پیچیده نظریه اعداد، تجزیه‌ی اعداد به عوامل اول (فاکتورگیری) بود. او نشان داد که چگونه یک مجموعه از عملیات ریاضی که برای کامپیوترهای کوانتومی طراحی شده اند، قابلیت تجزیه‌ی اعداد بزرگ (فاکتورگیری) را روی کامپیوترهای کوانتومی، بسیار سریع‌تر از کامپیوترهای کلاسیک دارند. با این اختراع، محاسبات کوانتومی از یک کنجکاوی به توجه جهانی تبدیل شد [۴، ۵]. در سال ۱۹۹۶ گراور الگوریتم مکانیکی کوانتومی سریع برای جستجوی دیتابیس را اختراع نمود [۶]. حوزه محاسبات کوانتومی مدرن، با کشف توزیع کلید کوانتومی عمومی توانایی ارسال یک بیت کوانتومی به کمک دو بیت کلاسیک و یک بیت درهم تنیدگی و توانایی ارسال دو بیت کلاسیک با ارسال یک بیت کوانتومی و یک بیت درهم تنیدگی آغاز شد [۷]. سپس محققین، تلاش‌های عمیق تری برای ترکیب منابع مخابرات کلاسیک، مخابرات کوانتومی و درهم تنیدگی برای فرمول‌بندی پروتکل‌های جدید کوانتومی انجام داده‌اند. در سال ۱۹۹۸ توسط جانانان جونز و میشل موسکا در دانشگاه آکسفورد و اندکی بعد توسط اسحاق چوانگ در مرکز تحقیقات IBM آلمان همراه با همکارانش در دانشگاه استنفورد و MIT، اولین نمایش تجربی از یک الگوریتم کوانتومی روی سیستم فیزیکی انجام



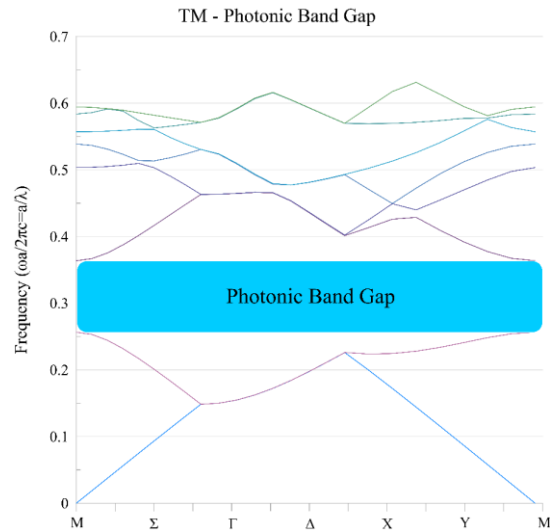
شکل (۳): ساختار پیشنهادی حفره‌های ایجاد شده بر بستر سیلیکون

ساختار دارای سه ورودی A و B و C است همین‌طور دارای سه خروجی P و Q و R است. در قسمت حلقه غیرخطی از دو میله با شعاع‌های متفاوت استفاده شده است. شعاع میله‌های R1 برابر با ۴۰ نانومتر و شعاع میله‌های R2 برابر با ۱۴۰ نانومتر است. جنس تمام میله‌های آبی‌رنگ از شیشه دوپ شده است. این ماده دارای ضریب شکست ۱٫۴ و ضریب شکست غیرخطی $10^{-14} \text{ m}^2/\text{w}$ است. حلقه غیرخطی طوری طراحی شده که وقتی ورودی با شدت $5 \text{ w}/\mu\text{m}^2$ به ساختار اعمال می‌شود روی حلقه غیرخطی تأثیر نمی‌گذارد و از آن عبور می‌کند ولی زمانی که ورودی با شدت $10 \text{ w}/\mu\text{m}^2$ به ساختار اعمال می‌شود روی حلقه غیرخطی اثر می‌گذارد و به داخل حلقه کوپل می‌شود. شکل ۳ نحوه اثرگذاری ورودی با شدت $10 \text{ w}/\mu\text{m}^2$ را نشان می‌دهد.

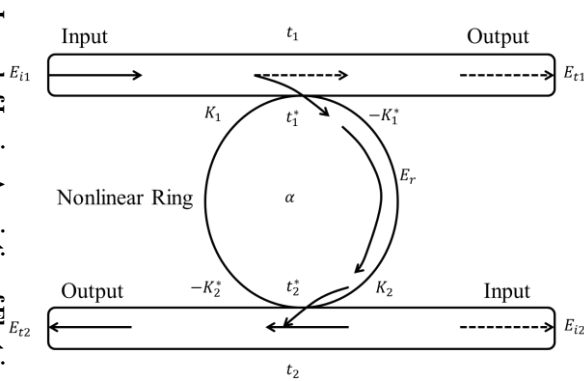


شکل (۱): بلوک دیاگرام گیت فردکین

طراحی المان‌های مبتنی بر فوتون مستلزم بررسی باند انرژی فوتونی PBG ساختار است. برای محاسبه PBG از روش موج تخت (PWE) استفاده می‌شود [۱۷، ۱۸]. PWE با حل معادله ماکسول در حوزه فرکانس [۱۷، ۱۸] فرکانس‌هایی از ساختار دوره‌ای را به دست می‌آورد. شکل ۲ باند فوتونی ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. محدوده باند ممنوعه فوتونی در شکل ۲ برابر با $0.363 < \omega < 0.463$ است. این طرح ما ابتدا یک‌لایه از سیلیکون را ایجاد کردیم. سپس حفره‌های هوا با ثابت شبکه ۱۰۰۰ نانومتر و شعاع ۱۷۷ نانومتر را ایجاد کردیم. بر اساس اصل مقیاس‌پذیری برای اینکه طول موج کاری دقیقاً روی ۱۵۵۰ نانومتر تنظیم شود مقدار ثابت شبکه را تغییر و آن را روی ۴۶۶ نانومتر تنظیم شده است. ساختار دارای ابعاد $91.1 \mu\text{m}^2$ است. شکل ۳ حفره‌های ایجاد شده بر بستر سیلیکون و همین‌طور ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۲): باند ممنوعه فوتونی



شکل (۴): ورودی با شدت $10 \text{ w}/\mu\text{m}^2$

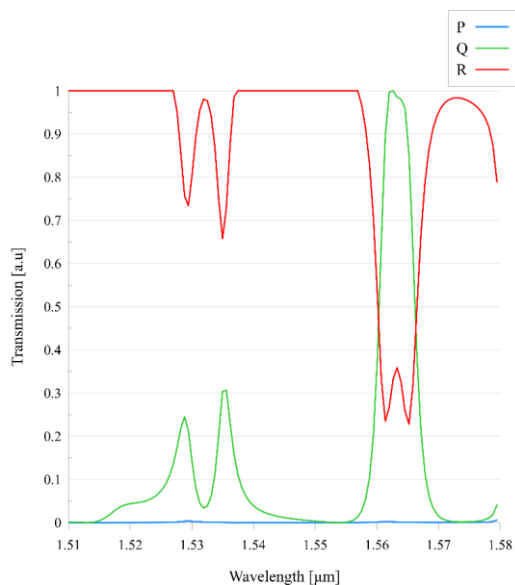
روابط حاکم بر شکل ۳ به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$E_{t1} = \frac{t_1 - t_2 * \alpha e^{i\theta}}{1 - t_1 - t_2 * \alpha e^{i\theta}} \quad (1)$$

برای قسمت ورودی که با E_{11} نشان داده شده است: در این رابطه α ضریب تلفات حلقه و θ برابر است با WL/C در این رابطه L برابر است با $2\pi r$ سرعت فاز برای مرکز حلقه با C و به صورت C_0/n_{eff} نشان داده می شود. فرکانس زاویه ای برابر است با $\omega = kc_0$ و c_0 سرعت نور در خلا هست. عدد موج را با K و با استفاده از λ می توان عدد موج را به دست آورد.

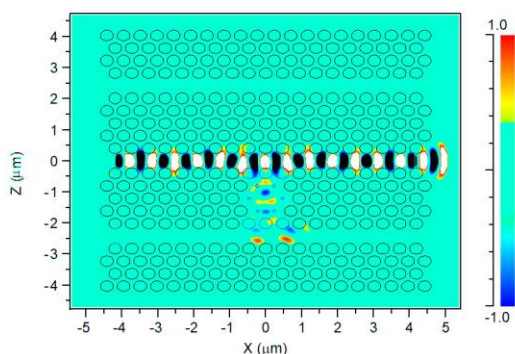
برای قسمت خروجی که با E_{12} نشان داده شده است:

$$E_{12} = \frac{-k_1 * k_2 a_1}{2e^{i\theta/2} (1 - t_1 - t_2 * ae^{i\theta})} \quad (2)$$

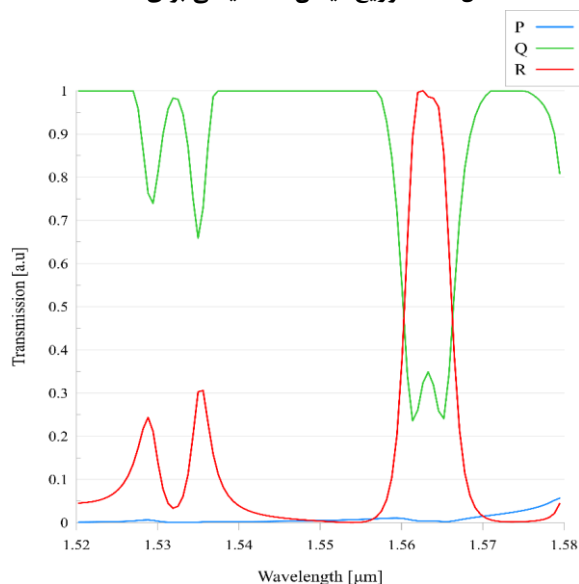


شکل (۶): خروجی برحسب طول موج برای حالت (۰۰۱)

با اعمال ورودی B با شدت $5 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ پس از عبور از حلقه خروجی Q را فعال می کند. شکل (۷) توزیع میدان مغناطیسی برای حالت (۰۱۰) را نشان می دهد.



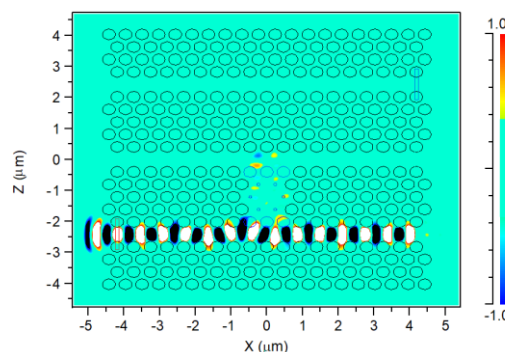
شکل (۷): توزیع میدان مغناطیسی برای حالت (۰۱۰)



شکل (۸): خروجی برحسب طول موج برای حالت (۰۱۰)

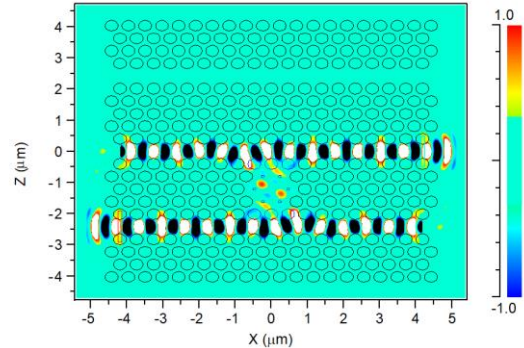
۳- نتایج شبیه سازی

بعد از اتمام مراحل طراحی، شبیه سازی را با اعمال میدان نوری ورودی به ساختار انجام دادیم. روش FDTD، یک روش حل قدرتمند برای حل معادله های ماکسول و یک فن انعطاف پذیر برای مطالعه باند وسیع و نیز محاسبه توزیع میدان های الکترومغناطیسی است [۱۹]. با این روش حل، می توان تمام ساختارهای پیچیده و نامتناوب را شبیه سازی کرد. همچنین می توان از آن برای محاسبه مدهای ویژه و به دست آوردن دیاگرام باند، نیز استفاده کرد. در این پژوهش از ابزار FullWAVE، برای بهره بردن از روش FDTD، استفاده شده است که در آن شرایط مرزی متناوب، لایه های تطبیق کامل به صورت همزمان برای ساختار بلور فوتونی در نظر گرفته شده است. با اعمال ورودی C با شدت $5 \text{ W}/(\mu\text{m}^2)$ پس از عبور از حلقه خروجی R را فعال می کند. شکل (۵) توزیع میدان مغناطیسی برای حالت (۰۰۱) را نشان می دهد.

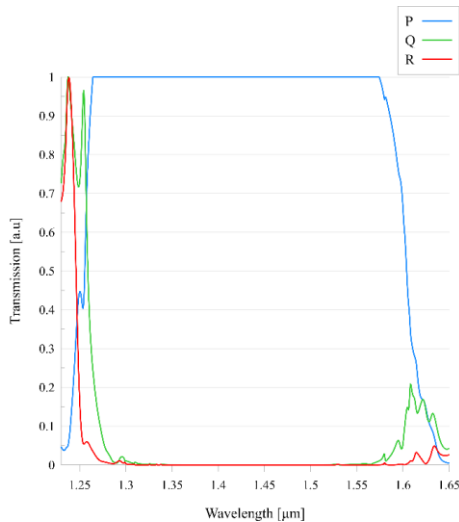


شکل (۵): توزیع میدان الکتریکی برای حالت (۰۰۱)

با اعمال همزمان ورودی B و C هنگامی که هر دو ورودی به حلقه غیرخطی می‌رسند روی هم تأثیر گذاشته و اجازه رزونانس را نداده و از حلقه عبور می‌کنند و دو خروجی Q و R را فعال می‌کند. شکل (۹) توزیع میدان برای حالت (۰۱۱) را نشان می‌دهد.

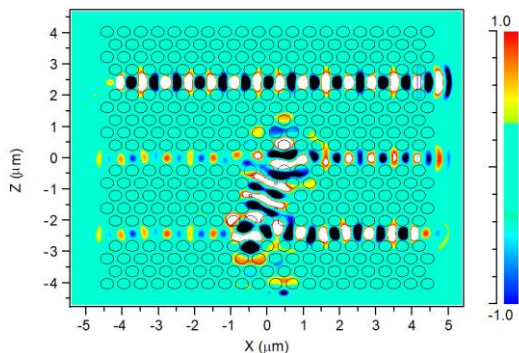


شکل (۹): توزیع میدان برای حالت (۰۱۱)

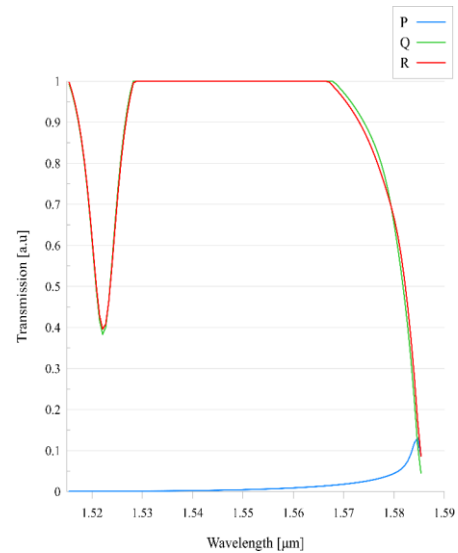


شکل (۱۰): خروجی برحسب طول موج برای حالت (۱۰۰)

با اعمال ورودی A و C و چون دو ورودی همزمان فعال هستند پس شدت ورودی $10 \text{ w}/\mu\text{m}^2$ و چون ورودی A دورتر از ورودی C قرار دارد هیچ‌گونه تأثیری روی هم ندارند و فقط شدت ورودی باعث رزونانس در قسمت حلقه غیرخطی شده و ورودی A خروجی P و ورودی C خروجی Q را فعال می‌کند. شکل (۱۳) توزیع میدان الکتریکی برای حالت (۱۰۱) را نشان می‌دهد.

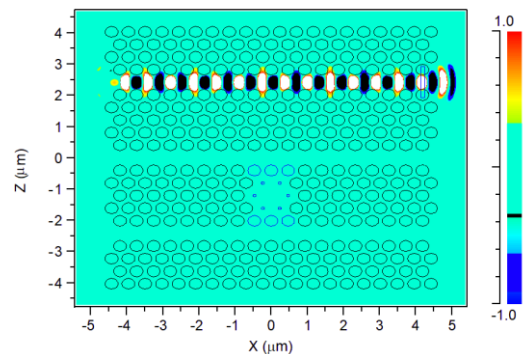


شکل (۱۱): توزیع میدان الکتریکی برای حالت (۱۰۱)

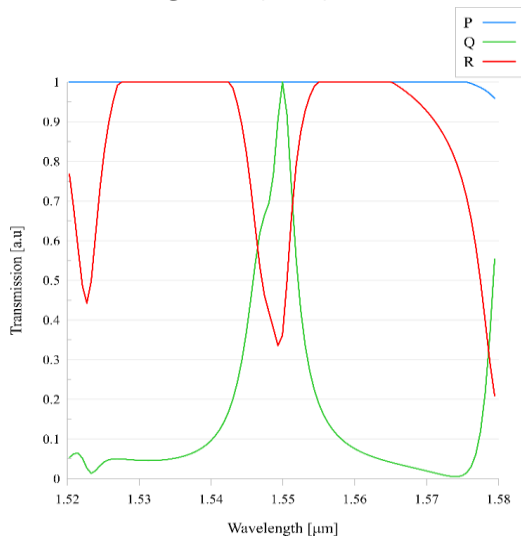


شکل (۱۲): خروجی برحسب طول موج برای حالت (۰۱۱)

با اعمال ورودی A فقط خروجی P فعال می‌شود. شکل (۱۱) توزیع میدان الکتریکی برای حال (۱۰۰) را نشان می‌دهد.

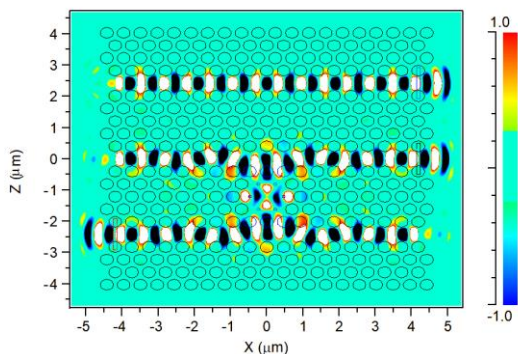


شکل (۱۳): توزیع میدان الکتریکی برای حال (۱۰۰)

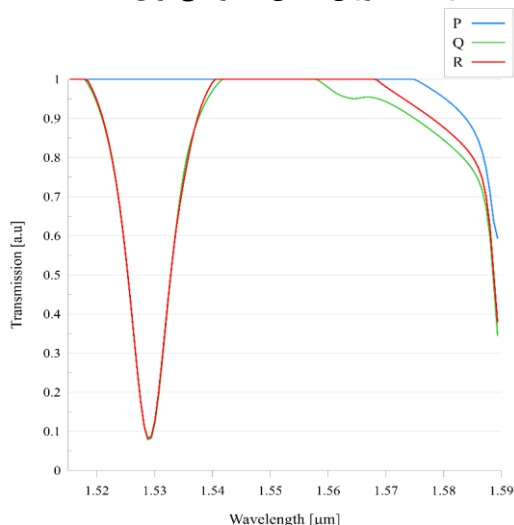


شکل (۱۴): خروجی برحسب طول موج برای حالت (۱۰۱)

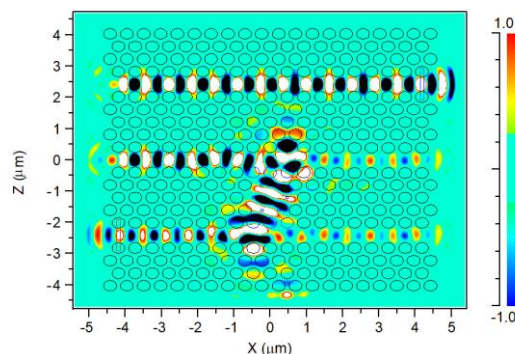
با اعمال ورودی A و B و چون دو ورودی همزمان فعال هستند پس شدت ورودی $10 \text{ w}/\mu\text{m}^2$ و چون ورودی A دورتر از ورودی B قرار دارد هیچ‌گونه تأثیری روی هم ندارند و فقط شدت ورودی باعث رزنانس در قسمت حلقه غیرخطی شده و ورودی A خروجی P و ورودی B خروجی R را فعال می‌کند. شکل (۱۵) توزیع میدان الکتریکی برای حالت (۱۱۰) را نشان می‌دهد.



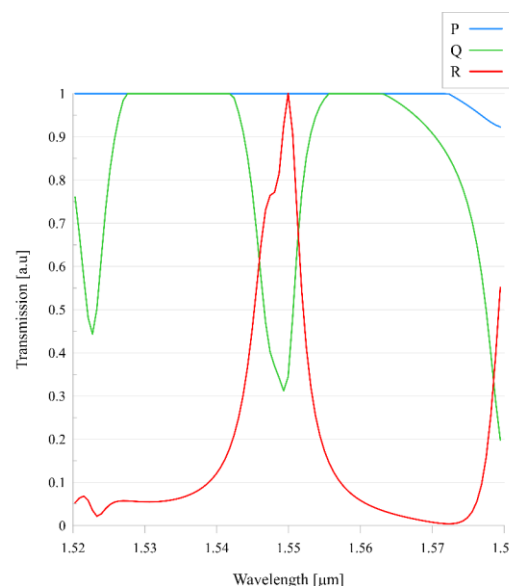
شکل (۱۷): توزیع میدان الکتریکی برای حالت (۱۱۱)



شکل (۱۸): خروجی برحسب طول موج برای حالت (۱۱۱)



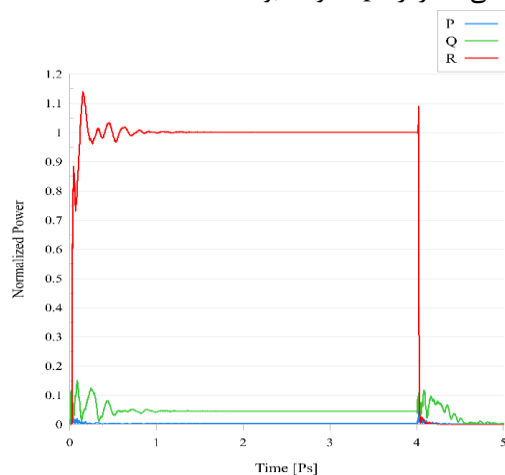
شکل (۱۵): توزیع میدان الکتریکی برای حالت (۱۱۰)



شکل (۱۶): خروجی برحسب طول موج برای حالت (۱۱۰)

نتایج پاسخ زمانی

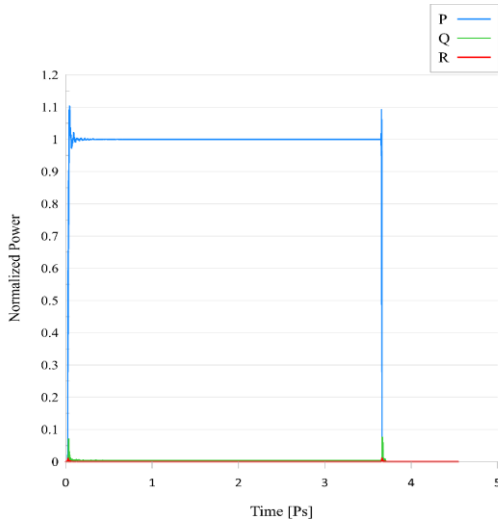
در ادامه جهت به دست آوردن دید عمیق‌تر نسبت به کارکرد مدل اعمالی، با روش حل عددی ارزیابی پاسخ زمانی برای حالت‌های مختلف گیت فردکین انجام خواهد شد. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود برای حالت ۰۰۱ پاسخ زمانی کمتر از 1ps خواهد بود.



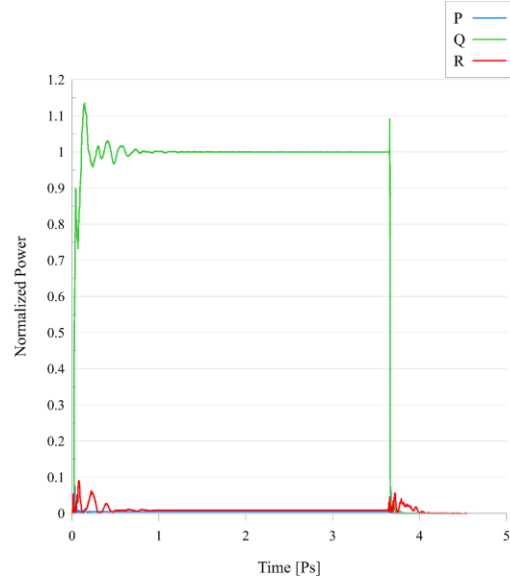
شکل (۱۹): خروجی برحسب زمان برای حالت (۰۰۱)

در حالت آخر با اعمال هر سه ورودی هر سه خروجی P و Q و R همزمان فعال می‌شوند. شکل (۱۷) توزیع میدان الکتریکی برای حالت (۱۱۱) را نشان می‌دهد.

جهت بررسی حالت ۰۱۰ شبیه‌سازی با تغییر مقادیر ورودی مجدد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل شماره ۲۰ نتیجه این حالت فراهم شده است.

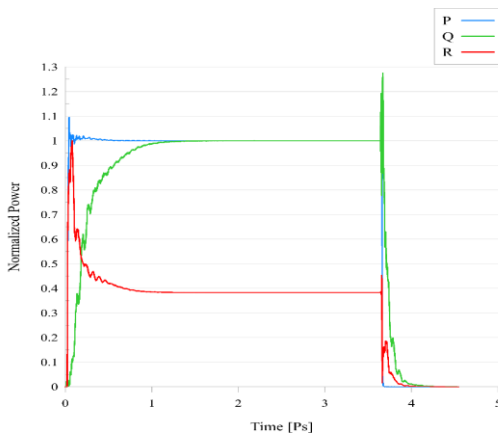


شکل (۲۲): خروجی برحسب زمان برای حالت (۱۰۰)



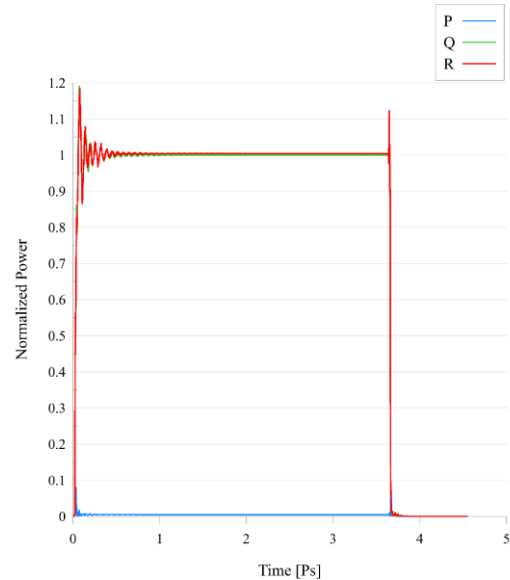
شکل (۲۰): خروجی برحسب زمان برای حالت (۰۱۰)

در حالت نرمال به عدد یک، شرایط ۱۰۱ برای ورودی‌ها را مورد ارزیابی زمانی قرار می‌دهیم. در شکل ۲۳ نتیجه این حالت فراهم شده است.



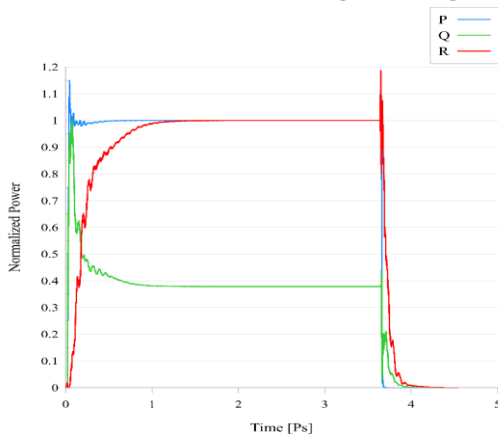
شکل (۲۳): خروجی برحسب زمان برای حالت (۱۰۱)

در ادامه ورودی‌ها را برای حالت ۰۱۱ تغییر می‌دهیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود انتقال توان با میزان قابل قبول و بازه زمانی در محدوده زیر 1ps را نشان می‌دهیم. در شکل شماره ۲۱ این نتیجه نشان داده شده است.



شکل (۲۱): خروجی برحسب زمان برای حالت (۰۱۱)

متناسب با جدول شماره یک، حالت‌های ۱۱۰ و ۱۱۱ نیز به ترتیب در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ مورد ارزیابی زمانی قرار گرفته‌اند که پاسخ زمانی توان انتقالی در ادامه فراهم شده است.



شکل (۲۴): خروجی برحسب زمان برای حالت (۱۱۰)

با توجه به جدول شماره ۱، حالت ۱۰۰ را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. نتیجه این شرایط در شکل ۲۲ نشان داده شده است.

در همین زمینه تحقیقات ارزشمندی توسط گروه های تحقیقاتی انجام شده است که در حوزه مواد دوبعدی و همچنین طراحی چندگیتی مورد توجه هستند و می توانند در ساختار پیشنهادی در تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد [۲۱-۲۳]. علاوه بر یافته های فوق بررسی اثرات جانبی مانند دما که در کارهای اخیر توسط گروه های تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته است، می تواند در حوزه پیشنهادی بررسی گردد [۲۴].

۴- نتیجه گیری

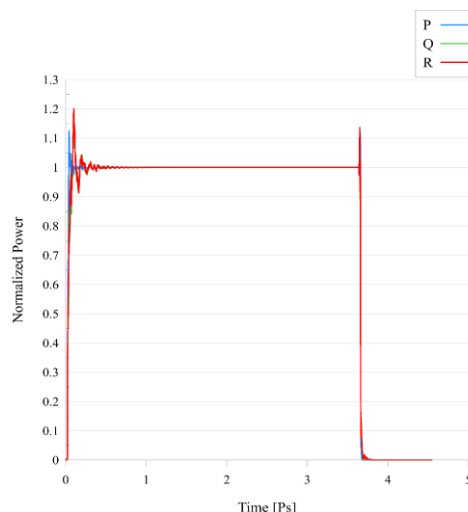
در این پژوهش به طراحی یک گیت فردکین تمام نوری پرداخته ایم. طرح کلی بسیار ساده و درعین حال ابعاد کوچکی دارد. گیت فردکین یک گیت جابجا کننده کنترلی است این گیت جامع و تعمیم پذیر است. اگر A صفر باشد دو ورودی دیگر به صورت مستقیم به خروجی ها می روند. اگر A یک شود دو ورودی دیگر به صورت متقاطع به خروجی ها می روند و در واقع در این حالت گیت ورودی ها را جابجا می کند. ساختار دارای سه ورودی A و B و C است همین طور دارای سه خروجی P و Q و R است. در قسمت حلقه غیرخطی از دو میله با شعاع های متفاوت استفاده شده است. شعاع میله های R1 برابر با ۴۰ نانومتر و شعاع میله های R2 برابر با ۱۴۰ نانومتر است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم فکری اعضای هیئت تحریریه مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] R. Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Processes," IBM Journal of Research and Development, Vol. 5, No. 3, pp. 183-191, (1961).
- [2] C. H. Bennet, "Logical Reversibility of Computation," IBM Journal of Research and Development, Vol. 17, No. 6, pp. 525-532, (1973).
- [3] D. Deutsch, "Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer," In Proceedings of the Royal Society London, Series A-Mathematical and Physical Sciences, Vol. 400, No. 1818, pp. 97-117, (1985).
- [4] P. W. Shor, "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring," In Proceedings of the IEEE 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, NM, pp. 124-134, (1994).
- [5] P. W. Shor, "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer," SIM Journal on Computing, Vol. 26, No. 5, pp. 1484-1509, (1997).
- [6] L. K. Grover, "A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search," In Proceeding of the 28th Annual ACM



شکل (۲۵): خروجی برحسب زمان برای حالت (۱۱۱)

مطالعه روی پاسخ زمانی و سرعت ابزار یکی از معیارهای مورد استفاده برای ارزیابی رفتار وسیله نوری است. به طور کلی، دستگاه های مبتنی بر فوتون بسیار سریع تر از دستگاه های مبتنی بر الکترون هستند. طول موج کاری، شعاع میله های دی الکتریک، شعاع نقص ها و همین طور ضریب شکست به طور مستقیم بر CR تأثیر گذار است [20]. نتایج شبیه سازی برای حالت های خیزش و افت گیت فردکین نوری در شکل های ۱۹-۲۰-۲۱-۲۲-۲۳-۲۴-۲۵ نشان داده شد. عملکرد گیت را می توان با محاسبه نسبت کنتراست (CR)، که نسبت بین قدرت خروجی منطق "۱" و منطق "۰" که به عنوان عملکرد هست، مورد مطالعه قرار داد.

جدول (۲): جدول زمانی خیزش و افت و همین طور نسبت کنتراست طرح پیشنهادی

Input			Output			Time [Ps]		
A	B	C	P%	Q%	R%	CR (db)	tr	tf
0	0	0	0	0	0	-	-	-
0	0	1	0	0	1	-	0.53	0
0	1	0	0	1	0	-	0.21	0
0	1	1	0	1	1	-	0.61	0
1	0	0	1	0	0	-	0.45	0
1	0	1	1	1	۱	4.31	0.53	0.03
1	1	0	1	۱	1	4.55	0.5	0.02
1	1	1	1	1	1	-	0.47	0

۱۴۰۱؛ ۱۹ (۲): ۳۱-۳۷

- [۲۳] قاضی اسدی حسن، نایبی پیمان. یکسوکنندگی در نانو دیود خودسوئیچ گرافنی با استفاده از آلایش گیت های جانبی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران ۱۴۰۰؛ ۱۸ (۱): ۹-۱۶
- [۲۴] قبادی نیره، افضلی کوشا علی. بررسی و مدل سازی اثر ناپایداری در دمای بالا و بایاس منفی (NBTI) و تزریق حامل های پرنرژی (HCI) در افزاره های چندگیتی نانومتری. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران ۱۳۹۴؛ ۱۲ (۲): ۱-۱۴

Symposium on the Theory of Computing (STOC), pp. 212-219, (1996).

- [7] C. H. Bennett, and G. Brassard, "Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing," In Proceeding of IEEE International Conference on Computer, System and Signal Processing, New York, pp. 175-179, (1984).
- [8] J. A. Jones, and M. Mosca, "Implementation of a Quantum Algorithm to Solve Deutsch's Problem on a Nuclear Magnetic Resonance Quantum Computer," Journal of Chemical Physics, Vol. 109, pp. 1648-1653, (1998).
- [9] G. Benenti, G. Casati, and G. Strini, "Principles of Quantum Computation and Information," Basic concepts, World Scientific Publishing, Vol. 1, (2004).
- [10] F. Mehdizadeh, M. Soroosh, H. Alipour-Banaei, and E. Farshidi, "All optical 2-bit analog to digital to converter using photonic crystal based cavities." Opt. Quantum Electron. 49, 38 (2017).
- [11] B. Youssefi, M.-M. K. Farshi, and N. Granpayeh, "Two bit all-optical analog-to-digital converter based on nonlinear kerr effect in 2D photonic crystals." Opt. commun. 285,3228-3228-3233 (2012).
- [12] A. Tavousi and M.-M. A. Birjandi, "Optical-analog-to-digital conversion based on successive-like approximations in octagonal-shape photonic crystal ring resonators," Superlattices Microstrukt. 114,23-31 (2017).
- [13] A. Tavousi M.-M. A. Birjandi, and M. Saffari, "Successive approximation-like 4-bit full-optical analog-to-digital converter based on kerr-like nonlinear photonic crystal ring resonators," Phys.E 83, 101-106 (2016).
- [14] F. Mehdizadeh, M. Soroosh, H. Alipour-Banaei, and E. Farshidi, "Ultra-fast analog-to-digital converter based on a nonlinear triplexer and an optical coder with a photonic crystal structure," Appl. Opt. 56,1799-1806 (2017).
- [15] P. Andalib and N. Granpayeh, "All-optical ultracompact photonic crystal AND gate based on nonlinear ring resonators." J. Opt. Soc. Am. B 26, 10-16 (2008).
- [16] F. Mehdizadeh, M. Soroosh, H. Alipour-Banaei, and E. Farshidi, "A novel proposal for all optical analog-to-digital converter based on photonic crystal structures." IEEE Photon. J. 9, 1-11 (2017).
- [17] Askarian, A., Akbarizadeh, G. and Fartash, M., "All-optical half-subtractor based on photonic crystals." Applied optics, 58(22), pp.5931-5935.(2019)
- [18] Askarian, A., Akbarizadeh, G. and Fartash, M., "A novel proposal for all optical half-subtractor based on photonic crystals." Optical and Quantum Electronics, 51(8), p.264. (2019)
- [19] Y. Kane, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 14, pp. 302-307, 1966.
- [20] R. Rajasekar, R. Latha, S. Robinson. "Ultra-contrast ratio optical encoder using photonic crystal waveguide". 0167-577X/(2019).

- [۲۱] نجعفرعلی جاسبی سمیه، جهانشاهی جواران فرزانه، خادم الحسینی حسین، صباغ ملاحسینی امیر. طراحی یک گیت اکثریت پنج ورودی تحمل پذیر اشکال در اتوماتای سلولی کوانتومی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران ۱۴۰۱؛ ۱۹ (۲): ۳۹-۴۵
- [۲۲] حری اشکان. طراحی گیت وارونگر جدید در منطق سه ارزشی مبتنی بر ترانزیستور نانو سیم. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران