**طراحی و شبیه­سازی یک کلید تمام نوری با استفاده از آرایه­های بلور فوتونی**

محمدجواد ملکی1، محمد سروش2\*

|  |  |
| --- | --- |
| 1دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق دانشگاه شهید چمران اهواز  | mj-maleki@stu.scu.ac.ir |
| 2\* استاد گروه مهندسی برق دانشگاه شهید چمران اهواز | m.soroosh@scu.ac.ir |

# چكيده

در این پژوهش، یک کلید تمام نوری با پاسخ سریع طراحی شده است. این کلید مبتنی بر بلورهای فوتونی با آرایش مربعی است. ساختار پایه شامل یک بستر دی­الکتریک با ضریب شکست 1/3 است که حفره­های هوا در آن قرار می­گیرند. ثابت شبکه و شعاع حفره­ها به ترتیب برابر 600 نانومتر و 120 نانومتر است. افزاره پیشنهادی از دو درگاه ورودی و دو درگاه خروجی تشکیل شده است. یک حلقه تشدیدی بین موج­برها قرار گرفته است تا بر اساس شدت نور ورودی بتواند انتقال نور به خروجی مناسب را انجام دهد. نتایج به­دست آمده از شبیه­سازی نشان می­دهند که ساختار پایه می­تواند طول موج­های مربوط به باندهای مخابراتی C و L را در موج­برها منتشر کند. زمان مورد نیاز برای کلیدزنی فقط 3/0 پیکوثانیه است که برای مدارهای نوری مناسب است. فاصله بین سطوح منطقی 0 و 1 حدود 57 درصد است و نسبت تمایز 3/9 دسی­ بل است. بر اساس نتایج به­دست آمده به­نظر می­رسد افزاره طراحی شده می­تواند در کاربردهای پردازش سیگنال استفاده شود.

**کليدواژه­ها:** بلور فوتونی، حلقه تشدیدی، گاف فوتونی، کلید نوری.

**Design and simulation of an all-optical switch using photonic crystal arrays**

**Mohammad Javad Maleki1, Mohammad Soroosh2\***

|  |  |
| --- | --- |
| 1 PhD student, Electrical Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz |  mj-maleki@stu.scu.ac.ir |
| 2\* Professor, Electrical Engineering Department, Shahid Chamran University of Ahvaz |  m.soroosh@scu.ac.ir |

**Abstract**

In this research, an all-optical switch with a fast response has been designed. This switch is based on photonic crystals in a square arrangement. Air holes are placed in a dielectric substrate with a refractive index of 3.1. The lattice constant and hole radii are equal to 600 nm and 120 nm, respectively. The proposed device includes two input ports and two output ports. A ring resonator is placed among the waveguides for light transmission to correct output according to the input light intensity. The obtained results of simulation show that the fundamental structure can propagate the wavelengths of C and L telecommunication bands in the waveguides. The needed time for switching is just 0.3 ps suitable for optical circuits. The difference between logic levels 0 and 1 equals about 57%, and the contrast ratio is 9.3 dB. According to the obtained results, it seems that the designed device can be used in optical processing applications.

Keywords: Photonic crystal, Ring resonator, Photonic bandgap, Optical switch.

**مقدمه**

نور در حال حاضر بهترین و سریع­ترین حامل برای پردازش و ارسال اطلاعات است، از این رو طراحی افزاره­های تمام نوری از اهمیت ویژه­ای برخوردار است. یکی از رایج­ترین بسترهای به­کار رفته برای طراحی افزاره­های نوری از جمله دیکدر ]1[­، جمع­کننده ]2[ و انکدر ]3[ استفاده از بلورهای فوتونی است. این بسترها، آرایه­های منظمی از مواد دی­الکتریک هستند که تابع توزیع ضریب شکست در آن­ها به صورت متناوب تغییر می­کند ]4-5[. برهم­کنش نور و ماده مهم­ترین ویژگی استفاده از بلورهای فوتونی برای افزاره­های نوری است. طراحی کلیدهای نوری به عنوان ساختارهای پایه و در ابعاد کوچک به­منظور بکارگیری در مدارهای مجتمع نوری نیز از اهمیت ویژه­ای برخوردار است. به­علت حبس شدگی ضعیف نور در فضاهای کوچک، طراحی کلیدهای نوری سریع با ابعاد بسیار کوچک همواره یک چالش به شمار می­رفت اما بلورهای فوتونی به دلیل ذات تناوبیشان این مشکل را تا اندازه­ای حل کرده­اند.

بلورهای فوتونی نوعی از ساختارهای مصنوعی ساخته شده از دی­الکتریک متناوب برای کنترل رفتار فوتون­ها هستند. باند ممنوعه فوتونی می­تواند با یک هندسه متناوب از شبکه­های بلوری ایجاد شود. تا کنون پژوهش­های مختلفی در زمینه افزاره­های نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی صورت گرفته است. در این پژوهش، یک کلید تمام نوری سریع و کوچک مبتنی بر بلورهای فوتونی ارائه می­شود که بر اساس شدت نور ورودی، عمل کلیدزنی را انجام می­دهد.

**طراحی کلید پیشنهادی**

برای طراحی کلید نوری مبتنی بر بلور فوتونی، در ابتدا ساختار اولیه بلور فوتونی شبیه­سازی شده و نمودار باندهای ممنوعه فوتونی به­دست می­آید. گستره مجاز طول موج منبع نور ورودی که امکان انتشار در ساختار مورد نظر را دارد، مشخص می­شود. با تغییر پارامترهای ساختار مانند ثابت شبکه و شعاع حفره­ها می­توان این بازه را تغییر داده و طول موج­های مجاز را در پنجره­های مخابراتی مطلوب تنظیم کرد. در مرحله بعد، ساختار کلید پیشنهادی شبیه­سازی شده و طول موج تشدید حلقه تشدیدگر تعیین می­شود. پس از تنظیم مشخصات ساختاری کلید و تعیین مد تشدید با توجه به کانال مخابراتی مورد نظر، آستانه شدت نوری منبع برای کلیدزنی تعیین شده و در نهایت مشخصه­های خروجی کلید ارائه می­شود.

ساختار پیشنهادی برای کلید نوری در شکل 1 نشان داده شده است. همان­گونه که مشخص است، این ساختار یک درگاه بایاس نوری (B)، یک درگاه ورودی (A) و دو درگاه خروجی (O1 و O2) دارد و عملکرد کلیدزنی توسط حلقه تشدیدگر صورت می­گیرد. ساختار متشکل از شبکه­ای از حفره­های هوا در بستر دی­الکتریک با چیدمان مربعی است. نوع ماده، بر اساس طول موج مورد نظر و ضریب جذب در آن طول موج انتخاب می شود. در ساختار مورد بحث، ضریب شکست زمینه 1/3 و ثابت شبکه (a) 600 نانومتر است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 1: ساختار پیشنهادی کلید نوری. |

برای تعیین شعاع حفره­های هوا (r)، گاف­های مدهای TM و TE باید بررسی شوند. نمودار گاف باند بلور استفاده شده در شکل 2 نشان داده شده است. در تمامی نمودارها محور افقی نسبت شعاع به ثابت شبکه است. در شکل 2-الف بازه گاف­های نوری برای دو مد TM و TE رسم شده است. در بازه­هایی که امکان انتشار موج الکترومغناطیسی با هر دو مد باشد، نمودار سبز رنگ می­شود. در ساختار مذکور چنین گستره­ای وجود ندارد. همان­گونه که در نمودار مشخص است، در نسبت 2/0 بیش­ترین گستره گاف در مد TE به­دست آمده است. در شکل­های 2-ب و 2-ج به­ترتیب، پهنای باندهای ممنوعه و هم­چنین نسبت آن­ها به­ازای نسبت­های شعاعی مختلف رسم شده است. با دقت در نمودارها می­توان تایید کرد که در نسبت شعاعی 2/0، بیش­ترین پهنای باند ممنوعه با بالاترین نسبت حاصل شده است. بنابراین در ادامه روند طراحی، a=0.2r انتخاب شده است.

|  |
| --- |
| (الف) |
| (ب) |
| (ج) |
| شکل 2: تحلیل ساختار باند بسامدی، الف) گستره­ مدها ب) پهنای گاف­های ممنوعه ج) نسبت گاف­های ممنوعه.  |

مرحله بعد، تعیین طول موج­های مجاز برای انتشار در ساختار انتخابی است. نمودار باند ممنوعه ساختار اولیه در شکل 3 نشان داده شده است. با دقت در شکل می­توان گفت ساختار مورد نظر دو باند ممنوعه در مد TE دارد. اولین باند ممنوعه در بازه بسامد بهنجار شده 0.321≤a/λ≤0.446 یا بازه طول موج 1345nm≤λ≤1869nm و دومین باند ممنوعه در بازه بسامد بهنجار شده 0.765≤a/λ≤0.779 یا بازه طول موج 770nm≤λ≤784nm است. اولین باند ممنوعه پهنای مناسب برای پوشش دادن پنجره سوم طول موج­های مخابرات نوری را داشته و طول موج مرکزی این پنجره در بازه به­دست آمده قرار دارد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 3: ساختار باند بسامدی بلور فوتونی. |

در ساختار پیشنهادی، هر یک از موج­برها با حذف حفره­ها تشکیل شده­اند. در مرکز ساختار، آرایه 5×5 مربعی به­ عنوان حلقه تشدیدگر و چهار حفره در اطراف حلقه به منظور افزایش کوپل نوری قرار گرفته­اند. در حفره های درون حلقه، شیشه چالکوجناید که ماده ای غیرخطی است تزریق می شود. طول موج منبع ورودی با طول موج تشدید حلقه تشدیدگر باید یکسان باشد به­همین منظور طیف خروجی حلقه باید تعیین شود. نمودار طیف خروجی در شکل 4 نشان داده شده است. با توجه به شکل، طول موج تشدید حلقه 1550 نانومتر تعیین شده است.

عملکرد کلیدزنی بر پایه اثر کر صورت می­گیرد بدین ترتیب که در شدت­های نور ورودی کم، نور اعمال شده از طریق کانال بایاس به درون حلقه تشدیدگر کوپل می­شود و از کانال خروجی O2 خارج می­شود ]6[. لازم به توضیح است که طول موج منبع نور ورودی با طول موج تشدید حلقه یکسان است.



شکل 4: طیف خروجی کلید تمام نوری.

در حالت دوم، هنگامی که نور از کانال ورودی A نیز کوپل شود، طبق اثر کر ضریب شکست موثر حلقه تشدیدگر تغییر کرده و بنابراین طول موج تشدید حلقه نیز تغییر می­کند. در این حالت، نور اعمال شده از کانال بایاس در حلقه تشدید نشده و از کانال خروجی O1 خارج می­شود.

آستانه شدت نور منبع برای رخ دادن اثر کر یکی از شاخص­های مهم افزاره­های نوری غیرخطی است. شدت نور اعمال شده به ساختارهای بلورهای فوتونی باید به­گونه­ای انتخاب شود که اثر کر غالب شود. به همین منظور، ابتدا باید شدت نور آستانه کلیدزنی ساختار تعیین شود. برای تعیین شدت توان ورودی مورد نیاز برای کلیدزنی بین دو درگاه خروجی، لازم است توان بهنجارشده خروجی در هر دو درگاه به ازای ورودی­های مختلف بررسی شود. هنگامی که سطح توان خروجی کانال­ها یکسان شود، آستانه کلیدزنی تعیین شده و با افزایش شدت نور ورودی عملکرد کلیدزنی مشخص تر می­شود.

نتایج تحلیل سطح توان­های خروجی دو درگاه برای بازه شدت نوری ورودی صفر تا 24 میلی وات بر میکرومتر مربع در شکل 5 نشان داده شده است.



شکل 5: نسبت انتقال توان نوری در ساختار پیشنهادی.

با توجه به شکل می­توان دریافت در شدت 1 میلی وات بر میکرومتر مربع، عملیات کلیدزنی بین خروجی­ها انجام شده است و توان بهنجار شده هر دو درگاه خروجی 5/0 است. در این حالت، بر اساس رابطه کر، میزان تغییرات ضریب شکست موثر تشدیدگر برابر 09/0 به­دست می­آید. در توان­های بیش­تر از این مقدار سهم بیش­تری از توان خروجی مربوط به درگاه O1 است و در توان­های کم­تر، سهم بیش­تر مربوط به درگاه O2 است.

به منظور ارزیابی عملکرد صحیح کلید پیشنهادی، توزیع میدان الکتریکی در ساختار برای دو حالت کاری توصیف شده در شکل 6 نشان داده شده است. در شکل 6-الف حالت خاموش ورودی A و در شکل 6-ب حالت روشن کانال A نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل 6: توزیع میدان الکتریکی در کلید پیشنهادی به­ازای دو حالت (الف) A خاموش و (ب) A روشن.

یکی از هدف­های مهم در طراحی افزاره­های نوری بکارگیری آن­ها در مدارهای مجتمع نوری است. هنگام مجتمع­سازی افزاره­ها و کوپل­های متوالی مورد نیاز، سطح توان خروجی و سرعت پردازش هر یک از افزاره­ها می­تواند در درستی عملکرد مدار تاثیرگذار باشد. علاوه بر آن، در افزاره­های تمام نوری دیجیتال، سطح صفر و یک منطقی قابل تشخیص برای هر یک بسیار مهم است. بازه­های صفر و یک منطقی خروجی یک افزاره باید در گستره مجاز صفر و یک منطقی ورودی افزاره پس از خود باشد. به همین دلیل در طراحی این دسته از افزاره­ها، تحلیل­های بیش­تری مورد نیاز است. در بحث کلیدهای نوری پارامترهای دیگر از جمله سرعت کلیدزنی و زمان پایداری نیز باید بررسی شود. سرعت افزاره­های کوپل شده قبل یا بعد کلید باید با سرعت کلید هم­خوانی داشته باشد. برای تعیین سرعت کلیدزنی و سطح توان خروجی، تحلیل زمانی و توان انجام گرفته و نتایج آن در شکل 7 نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل 7: تحلیل زمانی برای دو حالت (الف) A خاموش و (ب) A روشن.

برای تعیین زمان کلیدزنی، نمودار شکل 7-الف مورد نیاز است. همان­طور که مشخص است، زمان کلید زنی و تغییر درگاه خروجی از O1 به O2 حدود 3/0 پیکوثانیه است. برای ارزیابی بهتر کلید پیشنهادی نتایج استخراج شده از نمودارهای شکل 7 در جدول 1 خلاصه شده است. سرعت کلیدزنی ساختار پیشنهادی حدود 3 تراهرتز، سرعت کاری کلید 1 تراهرتز و حاشیه توان بهنجارشده خروجی 57 درصد است.

جدول 1: نتایج به­دست آمده از تحلیل زمانی افزاره.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| کانال خروجی | سطح توان بهنجار شده | زمان پایداری (ps) | زمان کلیدزنی (ps) |
| حالت 1 منطقی | حالت 0 منطقی |
| O1 | 60/0 | 03/0 | 1 | - |
| O2 | 92/0 | 01/0 | 1 | 3/0 |

به­عنوان آخرین تحلیل، سیگنال نوری مربعی به ساختار اعمال شده و نتیجه آن در شکل 8 نشان داده شده است. این تحلیل برای تعیین زمان­های فراز و فرود مورد نیاز است. همان گونه که در شکل مشخص است، پس از زمان 2 پیکوثانیه که موج ورودی مربعی از طریق درگاه A به کلید اعمال می­شود، با گذشت زمان 5/0 پیکوثانیه، موج خروجی در درگاه O1 به مقدار ماندگار خود رسیده و هم­چنین با قطع شدن نور در درگاه A، درگاه خروجی O1 نیز پس از گذشت 5/0 پیکوثانیه خاموش می­شود.



شکل 8: پاسخ زمانی کلید پیشنهادی به پالس نوری.

**نتيجه‌گيري**

در این مقاله، با استفاده از یک آرایش مربعی از حفره­های هوا در بستر یک دی­الکتریک، ساختار پایه­ای برای کلیدزنی تمام نوری پیشنهاد شد. استفاده از حلقه تشدیدی باعث شد تا با استفاده از اثر کر، بتوان ضریب شکست موثر حلقه را با تغییر شدت نور تابشی تغییر داد. بر این اساس، عمل کلیدزنی با توجه به شدت نور تابشی انجام شد. زمان کلیدزنی ساختار پیشنهادی برابر 3/0 پیکو ثانیه به­دست آمد. هم­چنین نسبت تفکیک سطوح منطقی تقریبا 57 درصد است که برای کاربردهای دیجیتالی مناسب است. با توجه به نتایج به­دست آمده از شبیه­سازی، ساختار پیشنهادی برای کاربردهای دیجیتالی مناسب به­نظر می­رسد.

**تشكر و قدرداني**

نويسندگان، مراتب تشكر و قدرداني خود از دانشگاه شهید چمران اهواز را برای حمایت از این مقاله اعلام می­دارند. شماره گرنت پشتیبان این مقاله، SCU.EE1400.672 است.

**مراجع و منابع**

[1] F. Mehdizadeh, H. Alipour-banaei, S. Serajmohammadi, Study the role of non-linear resonant cavities in photonic crystal-based decoder switches. J. Mod. Opt. **0340** (2017) 1–9

[2] M. Moradi, M. Danaie, A, A. Orouji, Design and analysis of an optical full-adder based on nonlinear photonic crystal ring resonators. Optik Int J Light Electron Opt, **172** (2018) 127–136

[3] T. A. Moniem, All-optical digital 4 × 2 encoder based on 2D photonic crystal ring resonators. J. Mod. Opt, **63** (2016) 735–741

[4] E. Yablonovitch, Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. Phys. Rev. Lett **58** (1987) 2059–2062

[5] S. John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices. Phys. Rev. Lett. **5** (1987) 2486–2489

[6] A. D. Petrenko, Nonlinear Kerr effect in magnetic crystals. Phys. Solid State, **41** (1999) 591–594