



Original Article

# Design and Optimization of All-optical Switches with the Ability to Be Used in Integrated Optical

Masoud Mohammadi<sup>1</sup>, Mahmood Seifouri<sup>1\*</sup>, Saeed Olyae<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajae Teacher Training University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Nano-Photonics and Optoelectronics Research Laboratory (NORLab), Shahid Rajae Teacher, Training University, Tehran, Iran

Received: 2025-01-03

Revised: 2025-06-14

Accepted: 2025-07-24

**Abstract:** In recent years, the use of ultrafast sensors with small dimensions for application in all-optical integrated circuits has attracted the attention of many researchers. In this paper, a proposed design of an optical switch based on a photonic crystal with two direct and crossed patterns using a combination of four resonators and two central and Add/Drop waveguides is presented. This photonic crystal is formed in the form of a square lattice with a lattice constant of 543 nm in the form of an arrangement of  $21 \times 29$  dielectric rods in the X Z plane in air. These dielectric rods are made of silicon in air with a radius of 109 nm, a linear refractive index of 3.46, and a filling factor of 0.2. In this switch, the control factors include the radius and refractive index of the coupling, dispersion, and internal rods. The performance parameters of the optical switch such as normalized output power, bit rate, response time, extinction ratio, internal loss, and interference are analyzed using the Finite-difference time-domain method. In this proposed switch, the response time in the direct mode is 0.123 picoseconds and in the cross mode is 0.485 picoseconds. Also, the data transfer rate in the direct mode is 13.8 terabits per second and in the cross mode is 2.06 terabits per second. In this design, the range of crosstalk changes with the direct and cross logo is between -5.6 dB to -17.32 dB, the extinction ratio in the direct mode is between -9.031 dB to -6.82 dB and in the cross mode .is between -31.2 dB to -13.8 dB

**Keywords:** Photonics, Optical Switch, Resonator, Integrated Circuits, All-optical Biosensor.

\*Corresponding Author: [mahmood.seifouri@sru.ac.ir](mailto:mahmood.seifouri@sru.ac.ir)

## How to Cite This Article:

Mohammadi M., Seifouri M., Olyae S. Design and Optimization of All-optical Switches with the Ability to Be Used in Integrated Optical Circuits Nanomeghyas. Nanomeghyas. 2025;12(1): 63-74. DOI: [10.22034/ns.2025.728082](https://doi.org/10.22034/ns.2025.728082)





# طراحی و بهینه سازی کلیدهای تمام نوری با قابلیت استفاده در مدارهای مجتمع نوری

مسعود محمدی، محمود صیفوری\*، سعید علیائی

گروه الکترونیک، دانشکده برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

**چکیده:** در سال های اخیر استفاده از سنسورهای فوق سریع با ابعاد کوچک جهت کاربرد در مدارات مجتمع تمام نوری مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در این مقاله طرح پیشنهادی یک کلید نوری مبتنی بر بلور فوتونی با دو الگوی مستقیم و متقاطع با استفاده از ترکیب چهار تشدیدگر و دو موجبر مرکزی و فرود/فزون ارائه شده است. این بلور فوتونی به صورت شبکه مربعی با ثابت شبکه ۵۴۳ نانومتر به صورت آرایشی از ۲۱ تا ۲۹۰ میله های دی الکتریک در صفحه XZ در هوا تشکیل شده است. این میله های دی الکتریک از جنس سیلیکون در هوا با شعاع ۱۰۹ نانومتر، ضریب شکست خطی ۳/۴۶، و ضریب پرشدگی ۰/۲ میباشند. پارامترهای کنترلی این کلید شامل شعاع و ضریب شکست میله های تزویج، پراکندگی و داخلی میباشند. پارامترهای عملکردی کلید نوری مانند توان خروجی نرمال شده، نرخ بیت، زمان پاسخ، نسبت خاموشی، تلفات داخلی و تداخل با استفاده از روش تفاضل محدوده در حوزه زمان تجزیه و تحلیل شده است. در این کلید پیشنهادی زمان پاسخ دهی در حالت مستقیم ۰/۱۲۳ پیکوثانیه و در حالت متقاطع ۰/۴۸۵ پیکوثانیه است همچنین نرخ انتقال دیتا در حالت مستقیم ۸/۱۳ ترابیت بر ثانیه و در حالت متقاطع ۲/۰۶ ترابیت بر ثانیه است. در این طرح محدوده تغییرات همسنوایی با الگوی مستقیم و متقاطع بین ۵/۶ - دسیبل تا ۱۷/۳۲ - دسیبل، نسبت خاموشی در حالت مستقیم بین ۹/۰۳۱ - دسیبل تا ۶/۸۲ - دسیبل و در حالت متقاطع بین ۲/۳۱ - دسیبل تا ۸/۱۳ - دسیبل تغییر میکنند.

واژگان کلیدی: فوتونیک، کلید نوری، تشدیدگر، مدارات مجتمع، تمام نوری

mahmood.seifouri@sru.ac.ir

## نحوه استناد به این مقاله:

محمدی، مسعود، صیفوری، محمود، علیائی، سعید. طراحی و بهینه سازی کلیدهای تمام نوری با قابلیت استفاده در مدارهای مجتمع نوری. *نانو مقیاس*، ۱۲(۱)، ۶۳-۷۴. DOI: 10.22034/ns.2025.728084



## ۱- مقدمه

ایفا می کند. حالت انتشار نور "روشن" و "خاموش" را با استفاده کامل از تعامل نور و ماده دستکاری می کند [۱۸]. با توجه به ایجاد باند ممنوعه در بلورهای فوتونی بعضی از فرکانس‌ها اجازه انتشار در ساختار را ندارند که در این شرایط بسته به فرکانس نور، "نور را روشن" یا "خاموش" می کنند. در این ساختارها با توجه به برهمکنش نور و ماده، می توان جریان نور را از طریق ماده کنترل کرد. این دستکاری حالت‌های انتشار نور می تواند برای کاربردهای مختلفی مانند کلیدهای نوری، فیلترها، حسگرها و سایر دستگاه‌های فوتونیک مورد استفاده قرار گیرد. توانایی کنترل انتقال نور از این طریق یکی از ویژگی های کلیدی بلورهای فوتونی است و پیامدهای قابل توجهی برای توسعه فناوری های نوری پیشرفته دارد [۱۹].

اولین بار در سال ۱۹۹۴ کلیدهای تمام نوری مبتنی بر بلور فوتونی غیرخطی توسط Scalora گزارش شد. در این کلید، جابجایی شکاف باند فوتونی با توجه به تغییرات نور پمپ شده به بلور گزارش شده بود. از آن زمان به بعد تحقق کلیدهای نوری با استفاده از نقص های مختلف، جابجایی شکاف باند، دوپایداری نوری، ایجاد اثرات نور غیرخطی در بلور، تلفیق و جفت شدگی موجبرها و نانو حفره ها ارائه شده است [۲۰].

سه پارامتر مهم کلیدهای نوری شامل زمان پاسخ، راندمان و شدت نور پمپ می باشد. شرایط بهینه برای یک کلید تمام نوری داشتن زمان پاسخ خیلی سریع، شدت نور کم پمپ و راندمان بالا می باشد [۲۱]. در این کلیدها شدت پمپ بالا در محدوده  $\text{GW/cm}^2$  جهت دستیابی به کلیدی با راندمان مورد نیاز می باشد، از دیدگاه دیگر شدت پمپ بالا باعث آسیب دیدن کلید می شود با توجه به این شرایط باید جهت تعیین توان پمپ ورودی بین محدودیت ها مصالحه ای انجام شود [۲۲]. از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ تحقیقات و بررسی های اولیه در مورد کلیدهای نوری با کاربرد در شبکه های نوری شروع شد. در این دوره تمرکز بر روی کنترل

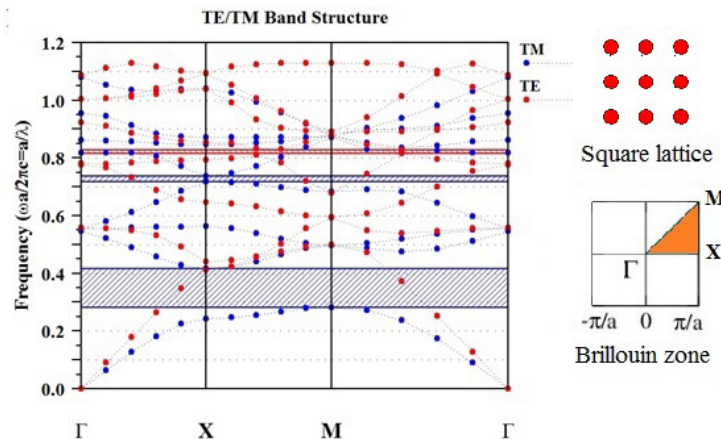
بلور فوتونی ساختارهای هستند که ضریب شکست در آنها به صورت متناوب در یک، دو یا سه بعد تغییر می کند. در حالت کلی با توجه به مشابهت معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد با معادله هلمهولتز در میدان، ساختارهای فوتونی به صورت دوگان بلورهای نیمه هادی تعریف شده است [۱-۳]. در بلورهای فوتونی نقش ضریب شکست در معادله هلمهولتز همانند پتانسیل الکتریکی در معادله شرودینگر است [۴]. بلورهای فوتونی جهت تحت تاثیر قرار دادن حرکت فوتون ها در ابعاد نانو طراحی می شوند. این ساختارهای پرپودیک از جنس دی الکتریک یا فلز دی الکتریک می باشد که می توانند بر مسیر امواج الکترومغناطیس تاثیرگذار باشند [۵]. به دلیل تناوبی بودن ساختار بلور فوتونی و تغییرات ضریب شکست در این ساختارها، فاصله های انرژی مشخصی بین باندهای فوتونی این ساختارها ایجاد می شود که به شکاف باند فوتونی معروف شده اند. این شکاف باند فوتونی امکان انتقال، تقسیم و کنترل نور با انرژی های مختلف را در ساختار فراهم می کند. با توجه به این قابلیت بلور فوتونی می تواند به عنوان یک فیلتر فوتونی عمل کند و امکان انتقال امواج فوتونی با انرژی های مشخص را فراهم کند [۶-۱۰]. از این قابلیت در بلورهای فوتونی برای طراحی ادوات فوتونی مانند کلیدهای نوری [۱۱]، مالتی پلکسرها و دی مالتی پلکسرها [۱۲]، سنسورها [۱۳، ۱۴]، فلیپ فلاپ ها [۱۵]، حافظه ها [۱۶]، شتاب سنج ها و ژيروسکوپ ها [۱۷] استفاده می شود. در این ساختارها اجازه انتشار فوتون ها به طول موج شان بستگی دارد. همچنین در بلورهای فوتونی بین طول موج انتشاری در بلور و ابعاد بلور با توجه به پدیده پراش یک ارتباط معناداری وجود دارد و به همین دلیل در این ساختارها ابعاد به صورت نصف طول موج انتشاری در نظر گرفته می شود. کلید تمام نوری نقش بسیار مهمی و کلیدی در زمینه ارتباطات نوری، کامپیوترهای نوری و پردازش اطلاعات با سرعت فوق العاده بالا

با آرایشی از میله‌های دی الکتریک در هوا تشکیل شده است. همچنین استحکام دی الکتریک پایین و تلفات بسیار کم انتشار در ساختار شبکه مربعی باعث افزایش استفاده از این ساختار در طراحی کلید های تمام نوری شده است [۲۷]. کلید نوری پیشنهادی از ترکیب میله های سلیکونی در صفحه XZ به صورت ۲۹۰۲۱ تشکیل شده است. ساختار بلور فوتونی طرح پیشنهادی به صورت میله های دی الکتریک از جنس سیلیکون در هوا با شعاع ۱۰۹ نانومتر، ضریب شکست خطی ۳/۴۶، و ضریب پخشندگی ۰/۲ می باشد. این ساختار دو بعدی دارای شکاف باند نوری دو بعدی در تمام جهت های انتشار در صفحه تناوب است. این صفحه تناوب به طور یکسان و نامتناهی در جهت عمودی گسترش یافته است. برای محاسبه شکاف باند بهینه ترین روش ها، روش های حوزه بسامد مانند PWE می باشد. در شکل (۱) نمودار شکاف باند ساختار پیشنهادی نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکاف باند فوتونی ساختار بلور پایه، دو باند ممنوعه فوتونی در مد TM (رنگ آبی) و یک باند ممنوعه فوتونی در مد TE (رنگ قرمز) وجود دارد. با توجه به اینکه پهنای اولین باند ممنوعه TM، جهت پوشش دادن پنجره سوم طول موج های مخابرات نوری مناسب و وسیع می باشد، به عنوان باند بهینه در نظر گرفته می شود. شکاف باند فوتونی برای این مد بهینه برابر  $0.426 \leq \frac{a}{\lambda} \leq 0.87$

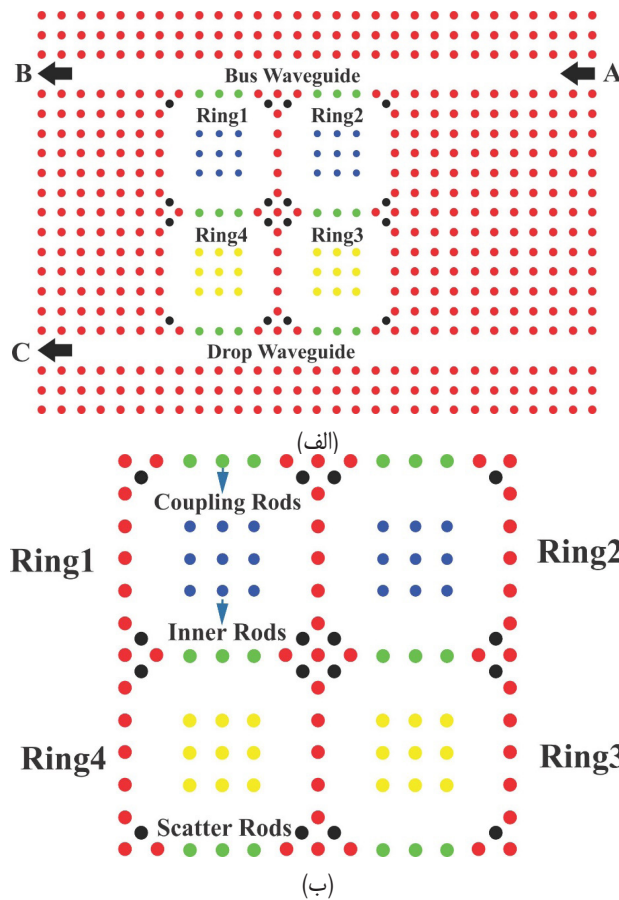
نور با استفاده از پارامترهای مهم کلید به شدت مورد توجه بود [۲۳]. از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ کاهش اندازه و بهبود کارایی این کلیدها با در نظر گرفتن کاهش مصرف انرژی و افزایش سرعت سوئیچینگ به عنوان یک گلوگاه اصلی مورد توجه محققان بود [۲۴]. از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ توسعه فناوری های نوین در ساخت کلیدهای فوتونی با مواد ترکیبی جدید با قابلیت بهبود عملکرد این کلیدها در باندهای نوری مختلف، و افزایش استحکام برای کاربردهای صنعتی و تحقیقات به شدت مورد توجه می باشد [۲۵]. از سال ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۲۵ سرعت کلیدهای نوری از ده پیکوثانیه به زیر فمتوثانیه رسیده است و همچنین با بهبود ساختارهای طراحی این کلیدها، انرژی مصرفی از میکرووات به زیر فمتوژول رسیده است [۲۵].

## ۲- طراحی ساختار کلید تمام نوری مبتنی بر فوتونیک کریستال

به طور کلی، کلیدهای نوری دارای دو حالت مستقیم و متقاطع می باشند. در وضعیتی که رینگ ها خاموش می باشند و طول موج تشدید فعال نمی باشد کلیدها در حالت مستقیم فعال هستند، در شرایطی که طول موج تشدید رینگ ها روشن هستند، کلید به صورت متقاطع عمل می کند [۲۶]. در این مقاله طراحی کلید تمام نوری مبتنی بر بلور فوتونی ارائه شده است. این بلور فوتونی به صورت شبکه مربعی



شکل ۱: نمودار شکاف باند فوتونی، توپولوژی شبکه، و ناحیه بریلوئن کلید پیشنهادی



شکل ۲: کلید نوری مبتنی بر بلور فوتونی با استفاده از تشدیدگرهای مربعی: (الف) طرح پیشنهادی، (ب) ترکیب تشدیدگرها و عوامل کنترلی رینگ ها

باعث بهبود وضعیت سوئیچینگ در حالت متقاطع شده است. در شکل (۲) طرح کلید تمام نوری پیشنهادی نشان داده شده است. میله‌های داخلی تشدیدگرها با توجه به تغییرات ضریب شکست شان موجب جابجایی طول موج خروجی می‌شوند و شعاع این میله‌ها کنترل توان خروجی از تشدیدگر را انجام می‌دهد که در نتیجه باعث کاهش تلفات نوری و بهبود عملکرد بهینه کلید می‌شود. در این طرح وجود رینگ های ۲ و ۴ باعث تقویت خروجی در طول موج تشدید در کلید می‌شود. طول کوپلینگ در تشدیدگرها که به عنوان عامل تعیین کننده در طول موج تشدید تشدیدگر می‌باشد، در حالت بهینه در با توجه به طول موج عملیاتی کلید دارای مقدار چهار برابر ثابت شبکه است. میله های کوپلینگ برای اطمینان از انتقال کامل سیگنال از موجبرها

است که متناسب با  $180.8 \text{ nm} \leq \tilde{e} \leq 1218 \text{ nm}$  خواهد بود. طرح کلید پیشنهادی دارای یک موجبر مرکزی، یک موجبر فرود و چهار تشدیدگر مربعی می‌باشد. موجبرهای مرکزی و فرود با ایجاد یک ردیف نقص خطی در ساختار فوتونیک کریستال دو بعدی ایجاد شده‌اند. تشدیدگرهای مربعی با حذف یک الگوی مربعی از میله‌های دی‌الکتریک با ابعاد چهار برابر ثابت شبکه ایجاد شده است.

عوامل کنترلی در تشدیدگرهای مربعی شامل شعاع و ضریب شکست میله های داخلی (رنگ مشکی)، کوپلینگ (رنگ سبز) و پراکندگی (رنگ آبی و زرد) می‌باشند. همچنین وجود میله های کوپلینگ باعث بهبود توان خروجی در طول موج تشدید، در تشدیدگرها می‌شود. فاصله بین تشدیدگرها و همچنین طول موج تشدید عوامل دیگری هستند که در این ساختار

### ۳-۱-۳- تداخل

کیفیت کلیدهای نوری توسط ارزیابی تداخل بین پورت‌های خروجی مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. که در این رابطه  $P_{SO}$  وان پراکنده در سایر پورت‌های خروجی و  $P_I$  وان ورودی است [۳۰].

$$CR(dB) = 10 \log\left(\frac{P_{SO}}{P_I}\right) \quad (۳)$$

### ۳-۱-۴- حساسیت

حساسیت به میزان تغییر سیگنال عبوری حسگر در پاسخ به کمترین تغییر آنالیت در ساختار سنجش تعریف می‌شود. اساساً حساسیت قدرت واکنش نور و ماده را نمایان می‌کند [۳۱]. حساسیت در کلیدهای نوری به صورت کوچکترین توان ورودی که به ازای آن در خروجی ساختار تغییر طول موج قابل تشخیص می‌باشد، تعریف می‌شود [۳۲]. حساسیت برابر با میزان جابجایی طیف انتقال توان تقسیم بر تغییرات ضریب شکست است. حساسیت از فرمول (۴) تعیین می‌شود [۳۱].

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (۴)$$

### ۳-۲- تحلیل شبیه سازی

در این طرح پیشنهادی نور از طریق پورت A با استفاده از موجبر مرکزی وارد کلید می‌شود. نور وارد شده با توجه به ثابت شبکه و شکاف باند فوتونی ساختار از محدوده طول موج ۱۵۳۰ نانومتر تا ۱۶۰۰ نانومتر به کلید وارد می‌شود. نور درون موجبر مرکزی با توجه به محدوده تغییرات طول موج ورودی دو مسیر را طی می‌کند. اگر نور عبوری در محدوده طول موج تشدید تشدیدگرها نباشد مسیر مستقیم را طی خواهد کرد و از طریق پورت ۲ از ساختار خارج می‌شود. اما اگر نور ورودی در محدوده طول موج تشدید تشدیدگرهای مربعی باشد، نور ورودی ابتدا از طریق دو تشدیدگر ۱ و ۲ به درون

به تشدید کننده‌ها و بالعکس در طول موج تشدید تشدیدگرها استفاده می‌شود. در چهار گوشه هر کدام از تشدیدگرها یک میله پراکندگی وجود دارد که این میله‌ها اثر پراکندگی و حالت‌های انتشار متقابل را کاهش می‌دهند که به طور نسبی تداخل و از دست دادن بازتاب کلید ارائه شده را به حداقل می‌رساند. ابعاد این کلید ۶۰۹ میکرومتر مربع است.

### ۳- تحلیل و شبیه سازی طرح پیشنهادی

در این بخش تحلیل پارامترهای کلیدی کلید پیشنهادی شامل نسبت خاموشی، تلفات داخلی، تداخل و شبیه سازی کلید با استفاده از روش تفاضل محدوده در حوزه زمان بررسی شده است.

#### ۳-۱- تحلیل پارامترهای کلیدی کلید

##### ۳-۱-۱- نسبت خاموشی

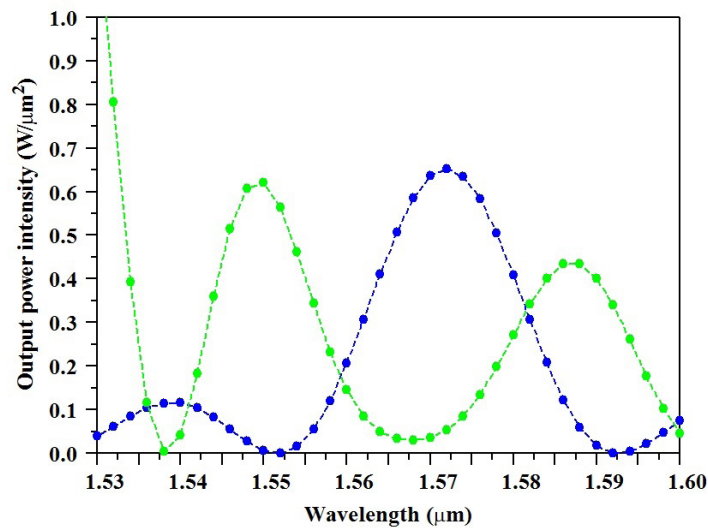
یکی از پارامترهای کلیدی که برای سنجش عملکرد کلید نوری در نظر گرفته می‌شود، نسبت خاموشی است. این پارامتر به صورت نسبت توان خروجی حالت روشن به حالت خاموش طبق رابطه (۱) تعریف شده است [۲۸].

$$ER(dB) = 10 \log\left(\frac{P_{low}}{P_{high}}\right) \quad (۱)$$

که در آن  $P_{low}$  وان خروجی کم در حالت روشن و  $P_{high}$  توان خروجی بالا در حالت خاموش است.

##### ۳-۱-۲- تلفات داخلی

در کلیدهای تمام نوری یکی دیگر از پارامترهای مهم، تلفات داخلی است که این تلفات به صورت نسبت توان خروجی نرمال شده به توان ورودی مطابق رابطه (۲) تعریف شده است [۲۹]. که در اینجا  $P_O$  وان خروجی و  $P_I$  وان ورودی است.



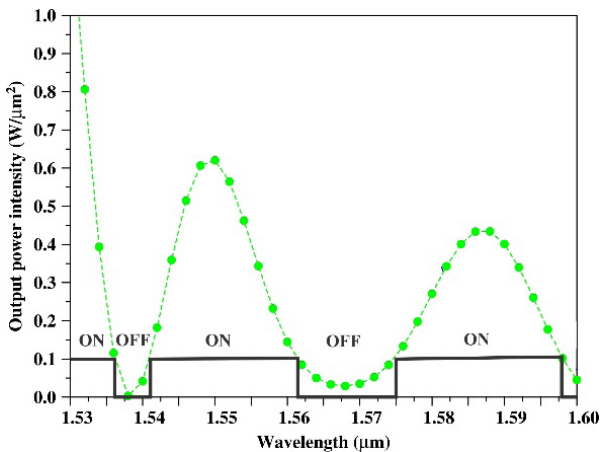
شکل ۳: تغییرات توان خروجی از پورت های B (رنگ سبز) و C (رنگ آبی) بر حسب طول موج عملکردی در کلید پیشنهادی

در شکل (۳) مشاهده می شود در چهار طول موج ۱۵۳۸ نانومتر (پورت C فعال و پورت B غیر فعال)، ۱۵۵۳ نانومتر (پورت B فعال و پورت C غیر فعال)، ۱۵۷۰ نانومتر (پورت C فعال و پورت B غیر فعال) و ۱۵۹۲ نانومتر (پورت B فعال و پورت C غیر فعال) در حالت کلیدینگ در ساختار مشاهده می شود. در حالت متقاطع بیشترین توان خروجی گزارش شده از پورت C در محدوده ۶/۷ وات بر میکرومتر مربع می باشد. همچنین کمترین توان برای ایجاد حالت روشن در پورت C در محدوده ۰/۱۵ وات بر میکرومتر مربع می باشد.

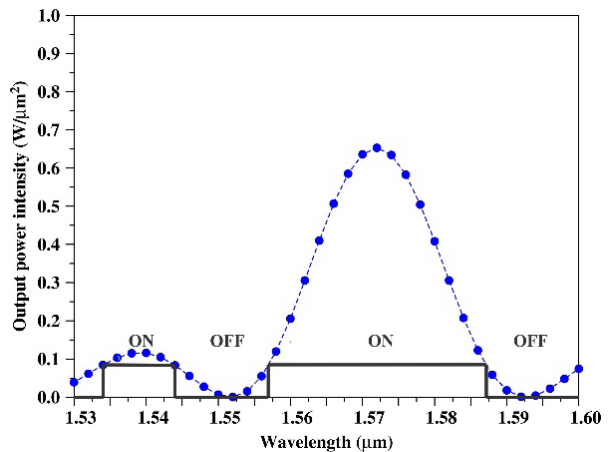
در شکل (۴) الف تغییرات توان خروجی از پورت C با توجه به تغییرات طول موج خروجی نشان داده شده است. از محدوده طول موج ۱۵۳۰ نانومتر تا ۱۶۰۰ نانومتر دو حالت روشن برای کلید در حالت متقاطع ایجاد شده است (حالت روشن اولی در ۱۵۳۴ نانومتر تا ۱۵۴۴ نانومتر و حالت روشن دومی در محدوده ۱۵۵۸ نانومتر تا ۱۵۸۷ نانومتر). بهترین طول کلید زنی این طرح پیشنهادی در حالت متقاطع ۲۹ نانومتر گزارش شده است. تغییرات توان خروجی از پورت B بر حسب طول موج عملیاتی کلید در شکل (۴) ب نشان داده شده است. در این شرایط در سه محدوده طول موج شامل ۱۵۳۰ نانومتر تا ۱۵۳۵

ترکیب تشدیدگرها وارد می شود. نور درون تشدیدگرها با توجه به تغییرات عوامل کنترلی تشدیدگر مانند ضریب شکست، شعاع و موقعیت فیزیکی میله های داخلی، میله های پراکندگی و میله های کوپلینگ به تشدیدگرهای ۳ و ۴ وارد می شوند. تشدیدگرهای ۲ و ۴ نقش تقویت کنندگی توان را در طول موج مرکزی تشدیدگر جهت طرح کلید دارند. میله های کوپلینگ مدیریت توان در پورت های خروجی را انجام می دهند. نور ورودی به کلید در طول موج تشدید در تشدیدگرهای ۱ و ۲ به صورت پادساعتگرد و در تشدیدگرهای ۳ و ۴ به صورت ساعتگرد می چرخد. چرخش نور در جهت ساعتگرد در تشدیدگرهای ۳ و ۴ باعث افزایش و تقویت توان خروجی از پورت C می شود و توان خروجی از پورت B را به مینیمم خود می رساند. میله های پراکندگی در ساختار کلید نقش کنترل تلفات را در دارند. با استفاده از این میله ها، پاشیدگی نور در زوایایی ۹۰ درجه ساختار موجبرها حداقل شده و نور با توان بهینه تری در خروجی پورت ها ایجاد می شود.

در شکل (۳) تغییرات توان خروجی از پورت های B (رنگ سبز) و C (رنگ آبی) را با توجه به تغییرات طول موج نوری ورودی در محدوده ۱۵۳۰ نانومتر تا ۱۶۰۰ نانومتر نشان داده شده است. همانطور که



(ب)



(الف)

شکل ۴: محدوده روشن و خاموش بودن کلید پیشنهادی بر حسب طول موج عملکردی با (الف) الگوی متقاطع (ب) الگوی مستقیم

جدول ۱. پارامترهای نسبت خاموشی و تلفات داخلی کلید پیشنهادی با الگوی مستقیم و متقاطع در طول موج های عملکردی

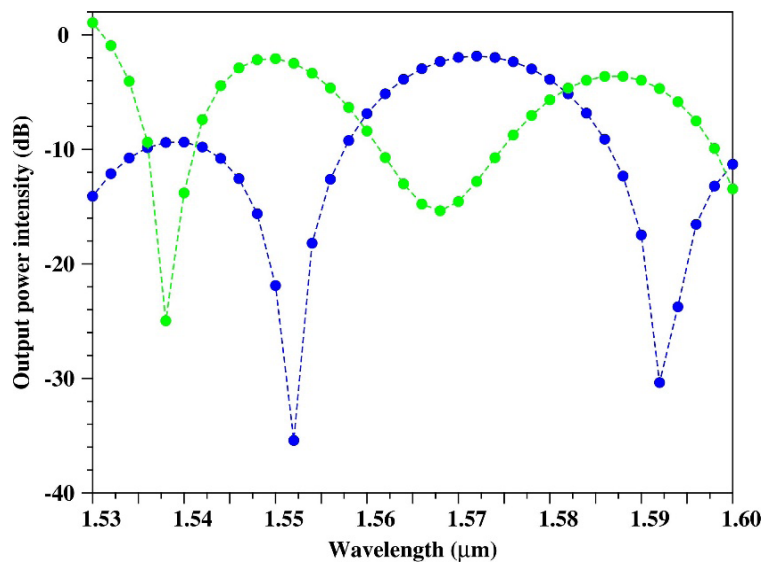
الگوی خروجی	پارامتر کلید	طول موج ورودی				
		۱۵۳۲ نانومتر	۱۵۴۰ نانومتر	۱۵۵۰ نانومتر	۱۵۷۰ نانومتر	۱۵۸۸ نانومتر
حالت متقاطع	نسبت	-	-۲/۳۱	-	-۸/۱۳	-
حالت مستقیم	نسبت خاموشی (دسیبل)	-۹/۰۳۱	-	-۸/۳۳	-	-۶/۸۲
حالت متقاطع	تلفات داخلی	-	۸/۲۴	-	۲/۵۹	-
حالت مستقیم	تلفات داخلی (دسیبل)	۰/۹۷	-	۱/۸۸	-	۱/۴۲

و متقاطع بین ۵/۶ - دسیبل تا ۱۷/۳۲ - دسیبل می باشد.

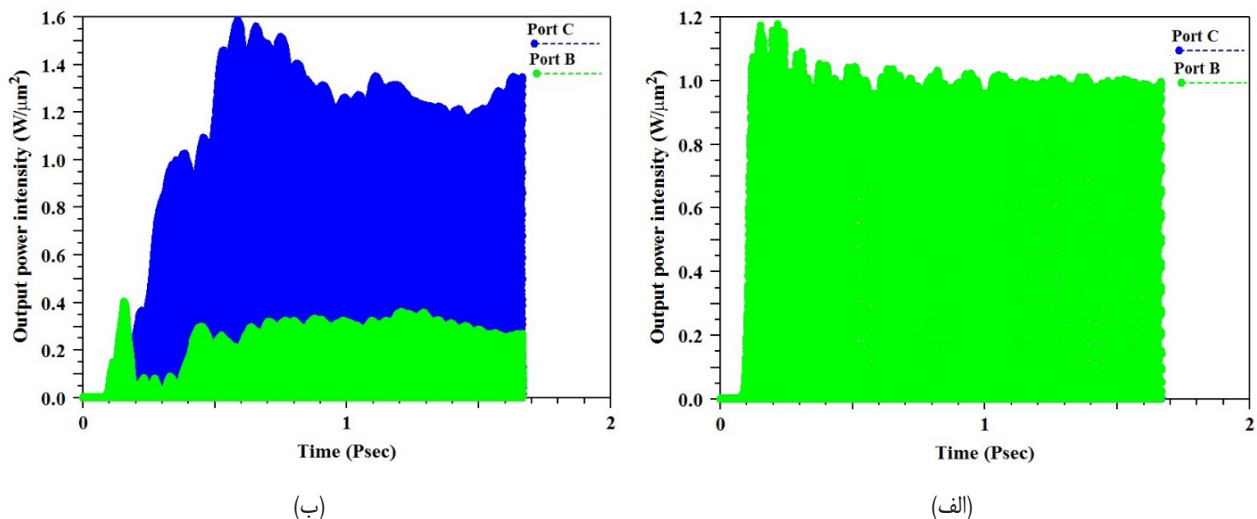
در کلید های نوری مبتنی بر بلور فوتونی خاموش و روشن بودن تشدیدگر و همچنین طول موج مرکزی تشدیدگر نقش به سزایی در طراحی ساختار بازی می کند و همچنین به طور مستقیم بر توان خروجی نرمالیزه شده از پورت مستقیم و متقاطع کلید، تاثیر می گذارد. معمولاً کلید های نوری به توان خروجی نرمال شده بسیار بالایی نیاز دارند تا با توجه به این توان بتوانند مستقیماً نسبت خاموشی را افزایش، تلفات داخلی را کاهش و تداخل را به حداقل برسانند. در شکل (۶) در بخش (الف)، تغییرات توان

نانومتر، ۱۵۴۲ نانومتر تا ۱۵۶۲ نانومتر و ۱۵۷۵ نانومتر تا ۱۵۹۷ نانومتر، کلید نوری (در حالت مستقیم) دارای خروجی مناسب در محدوده روشن می باشد.

در این کلید با توجه به الگوی توان خروجی از پورت ها دو حالت مستقیم (خروجی پورت A) و متقاطع (خروجی پورت B) تعریف شده است. با توجه به الگوی های خروجی کلید و همچنین طول موج های ورودی نسبت خاموشی و تلفات داخلی در کلید پیشنهادی مطابق جدول (۱) ارایه شده است. در شکل (۵)، نمودار همشنوایی کلید پیشنهادی نشان داده شده است. در این نمودار محدوده تغییرات همشنوایی پورت های خروجی کلید در حالت مستقیم



شکل ۵: تغییرات همسنوایی پورت های خروجی کلید پیشنهادی در حالت مستقیم و متقاطع با توجه به تغییرات طول موج



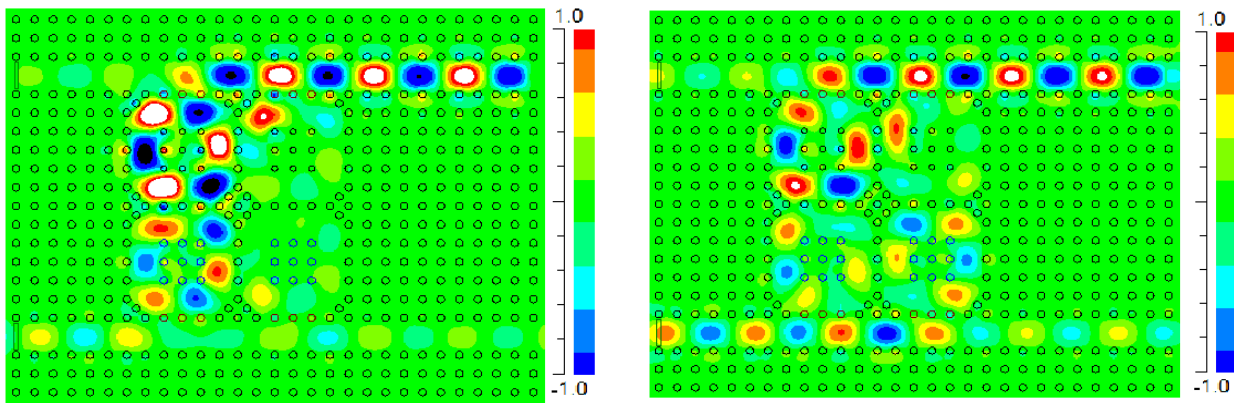
شکل ۶: تغییرات توان خروجی بر حسب زمان از پورت B (رنگ سبز) در الگوی مستقیم و پورت C (رنگ آبی) در الگوی متقاطع در کلید پیشنهادی

پاسخ دهی کلید پیشنهادی نرخ انتقال بیت در ثانیه در حالت مستقیم ۸/۱۳ ترا بیت بر ثانیه و در حالت متقاطع ۲/۰۶ ترا بیت بر ثانیه است.

برای وضوح بهتر پرو فایل توضیح میدان در کلید نوری با الگوی متقاطع در شکل (۷) نشان داده شده است.

در کلید تمام نوری پیشنهادی حساسیت با توجه به تغییرات طول موج بر حسب تغییرات ضریب شکست در رینگ های ۱، ۲، ۳ و ۴ در محدوده ۳۲۰ تا ۳۹۵ نانومتر بر RIU تغییر می کند.

خروجی بر حسب زمان از پورت B (رنگ سبز) در الگوی مستقیم کلید نشان داده شده است. در شکل (۶) در بخش (ب)، تغییرات توان خروجی بر حسب زمان از پورت C (رنگ آبی) در الگوی متقاطع کلید نشان داده شده است. در این کلید در حالت مستقیم زمان رسیدن به خروجی پایدار ۰/۳ پیکوثانیه و در حالت متقاطع زمان رسیدن به خروجی پایدار ۱/۲ پیکوثانیه می باشد. همچنین زمان پاسخ دهی در این کلید در حالت مستقیم ۰/۱۲۳ پیکو ثانیه و در حالت متقاطع ۰/۴۸۵ پیکو ثانیه است. با توجه به زمان



شکل ۷: پروفایل توزیع میدان در کلید نوری با الگوی متقاطع (الف) طول موج ورودی ۱۵۷۰ نانومتر (ب) طول موج ورودی ۱۵۶۳ نانومتر

۵/۶ - دسیبل تا ۱۷/۳۲ - دسیبل می باشد. نسبت خاموشی در خروجی های طرح پیشنهادی در حالت مستقیم بین ۹/۰۳۱ - دسیبل تا ۶/۸۲ - دسیبل و در حالت متقاطع بین ۲/۳۱ - دسیبل تا ۸/۱۳ - دسیبل تغییر می کنند. تلفات داخلی در سه وضعیت کلید زنی با حالت مستقیم ۰/۹۷ دسیبل، ۱/۸۸ دسیبل و ۱/۴۲ دسیبل و این تلفات در دو وضعیت کلید زنی با حالت متقاطع ۸/۴۲ دسیبل و ۲/۵۹ دسیبل گزارش شده است. این کلید دارای فوت پرینت ۳۳ میکرومتر مربع می باشد. با توجه به این ابعاد این کلید برای کاربرد در مدارات مجتمع تمام نوری با سرعت بالا و شبکه های نوری سرعت بالا بسیار مناسب می باشد.

### تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق ابلاغ گزنت شماره ۵۹۷۳/۸۳ مورخ ۱۴۰۳/۱۰/۱۱ انجام گردیده است.

### تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین وسیله اعلام می دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

در بخش (الف) طول موج توان ورودی ۱۵۷۰ نانومتر و در بخش (ب) طول موج توان ورودی ۱۵۶۳ نانومتر است.

### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی و شبیه سازی کلید تمام نوری مبتنی بر بلور فوتونی با استفاده از ترکیب تشدیدگرهای مربعی و موجبرهای مرکزی و فرود/فزون ارائه شده است. طول موج تشدید در حالت روشن و خاموش به شدت بر کنترل توان خروجی از پورت های کلید در حالت مستقیم و متقاطع تاثیرگذار می باشد. برای کنترل خروجی این نوع کلید ها از نظر توان و طول موج، از تغییرات شعاع و ضریب شکست در میله های تزویج، داخلی و پراکندگی استفاده شده است. این کلید تمام نوری در محدوده ۱۵۳۰ نانومتر تا ۱۶۰۰ نانومتر در حالت مستقیم دارای دو حالت کلید زنی (در طول موج های مرکزی ۱۵۳۸/۵ نانومتر و ۱۵۷۲/۵ نانومتر) و در حالت متقاطع دارای سه حالت کلید زنی (در طول موج های مرکزی ۱۵۳۲/۵ نانومتر، ۱۵۵۱/۵ نانومتر و ۱۵۸۶/۳ نانومتر) می باشد. در این طرح پیشنهادی در حالت مستقیم زمان رسیدن به خروجی پایدار ۰/۳ پیکوثانیه و در حالت متقاطع زمان رسیدن به خروجی پایدار ۱/۲ پیکوثانیه می باشد. در این کلید محدوده تغییرات همسنوایی بین خروجی های کلید در حالت مستقیم و متقاطع بین

## مراجع

- [12] M. Mohammadi, M. Seifouri, S. Olyae and M. Karamirad, Optimization and realization all-optical compact five-channel demultiplexer using 2D photonic crystal based hexagonal cavities. *Journal of Computational Electronics*, Vol. 20, pp.984-992, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10825-021-01671-1>
- [13] M. Mohammadi, and M. Seifouri, Numerical investigation of photonic crystal ring resonators coupled bus waveguide as a highly sensitive platform. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, Vol. 34, pp.11-18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2019.02.002>
- [14] M. Mohammadi, S. Olyae and M. Seifouri. Passive integrated optical gyroscope based on photonic crystal ring resonator for angular velocity sensing. *Silicon*, Vol. 11, No. 6, pp.2531-2538, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-0040-9>
- [15] D.G.S Rao, V. Palacharla, S. Swarnakar and S. Kumar, Design of all-optical D flip-flop using photonic crystal waveguides for optical computing and networking. *Applied Optics*, Vol. 59, No. 23, pp.71397143, 2020. <https://doi.org/10.1364/AO.400223>
- [16] M. Mohammadi, M. Farahmand, S. Olyae, and M. Seifouri, An overview of all-optical memories based on periodic structures used in integrated optical circuits. *Silicon*, Vol. 14, No. 14, pp.8661-8680, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01621-3>
- [17] M. Mohammadi, M. Seifouri, and S. Olyae, Theoretical investigation and optimization of rotation sensing in the new photonic crystal gyroscope based on the Sagnac effect using nonlinear photonic resonators. *Modern Physics Letters B*, Vol. 38, No. 18, p.2450137, 2024. <https://doi.org/10.1142/S0217984924501379>
- [18] D.G.S. Rao, S. Swarnakar, V. Palacharla, K. S. R. Raju and S. Kumar, Design of all-optical AND, OR, and XOR logic gates using photonic crystals for switching applications. *Photonic Network Communications*, Vol. 41, pp.109-118, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11107-020-00916-6>
- [19] R. Rajasekar, K. Parameshwari, and S. Robinson, Nano-optical switch based on photonic crystal ring resonator. *Plasmonics*, Vol. 14, No. 6, pp.1687-1697, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-00955-4>
- [20] R. Soref, Tutorial: Integrated-photonic switching structures. *Apl Photonics*, Vol. 3, No. 2, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5017968>
- [21] T. Tanabe, M. Notomi, S. Mitsugi, A. Shinya, and E. Kuramochi, All-optical switches on a silicon chip realized using photonic crystal nanocavities. *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 15, 2005. <https://doi.org/10.1063/1.2089185>
- [22] M. Notomi, T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, and
- [1] M. Skorobogatiy and J. Yang, *Fundamentals of photonic crystal guiding*. Cambridge university press, 2009. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511575228>
- [2] S. Kuzuaki, and K. Sakoda. *Optical properties of photonic crystals*, Berlin: Springer, Vol. 2, P-253, 2005.
- [3] J.M Lourtioz., H. Benisty, V. Berger, J. M Gerard, D. Maystre and A. Tchelnokov, *Photonic crystals. Towards Nanoscale Photonic Devices*, 2005.
- [4] C. Fenzl, T. Hirsch and O. S Wolfbeis, *Photonic crystals for chemical sensing and biosensing*. *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 53, No. 13, pp.3318-3335, 2014. <https://doi.org/10.1002/anie.201307828>
- [5] K. Yao and Y. Zheng, *Fundamentals of Nanophotonics*. In *Nanophotonics and Machine Learning: Concepts, Fundamentals, and Applications* Cham: Springer International Publishing, pp. 1-33, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20473-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20473-9_1)
- [6] A. Banerjee, Wavelength demultiplexing by using a defect layered 1D quaternary photonic band gap structure. *Journal of Optics*, pp.1-3, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01521-2>
- [7] M. K. Chhipa, B. T. Madhav, S. Robinson, V. Janyani and B. Suthar, Realization of all-optical logic gates using a single design of 2D photonic band gap structure by square ring resonator. *Optical Engineering*, Vol. 60, No. 7, pp.75104-75104, 2021. <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.7.075104>
- [8] A. H. Aly, D. Mohamed, Z. A. Zaky, Z. S. Matar, N. S. El-Gawaad, A. S. Shalaby, F. Tayeboun and M. Mohaseb, Novel biosensor detection of tuberculosis based on photonic band gap materials. *Materials Research*, Vol. 24, p. 20200483, 2021. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2020-0483>
- [9] J. N. Winn, R. D. Meade and J. D. Joannopoulos, Two-dimensional photonic band-gap materials. *Journal of Modern Optics*, Vol. 41, No. 2, pp.257-273, 1994. <https://doi.org/10.1080/09500349414550311>
- [10] G. Yu, X. Zhang, X. Chen, H. Wang and Y. Shen, Design of unidirectional and tunable channels in two-dimensional photonic crystal composed of local PT symmetric structure. *Journal of Optics*, Vol. 53, No. 2, pp.1042-1049, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01246-2>
- [11] J.Y. Su, X. Q. Huang, H. L. Xu, J. Y. Zhou, and Z. M. Meng, Ultrafast all-optical switching in a silicon-polymer compound slotted photonic crystal nanobeam cavity. *Optical Review*, Vol. 30, No. 1, pp.33-40, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10043-022-00779-4>

- [28] R. Rajasekar, K. Parameshwari and S. Robinson, Nano-optical switch based on photonic crystal ring resonator. *Plasmonics*, Vol. 14, No. 6, pp.1687-1697, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-00955-4>
- [29] K. Suzuki, R. Konoike, J. Hasegawa, S. Suda, Matsuura, H., Ikeda, K., Namiki, S. and H. Kawashima. Low-insertion-loss and power-efficient 32· 32 silicon photonics switch with extremely high- $\Delta$  silica PLC connector. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 37, No. 1, pp.116-122, 2019. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2867575>
- [30] Q. Saudan, D. A. Bekele, G. Dong, Y. Yu, K. Yvind, J. Mørk and M. Galili, Crosstalk-free all-optical switching enabled by Fano resonance in a multi-mode photonic crystal nanocavity. *Optics Express*, Vol. 30, No. 5, pp.7457-7466, 2022. <https://doi.org/10.1364/OE.449588>
- [31] M. Qin, J. Li and Y. Song, Toward high sensitivity: Perspective on colorimetric photonic crystal sensors. *Analytical Chemistry*, Vol. 94, No.27, pp.9497-9507, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c01804>
- [32] M. Mohammadi, S. Olyaei and M. Seifouri.. Design and optimization of passive optical gyroscope, based on nanostructures ring resonators for rotation sensing applications. *Optical and Quantum Electronics*, 54(11), p.696, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04079-8>
- H. Taniyama, On-Chip All-Optical Switching and Memory by Silicon Photonic Crystal Nanocavities. *Advances in Optical Technologies*, Vol. 3, 2008. <https://doi.org/10.1155/2008/568936>
- [23] D. Tina, M. Soroosh, and K. Ansari-Asl. "Low-power all-optical switch based on slow light photonic crystal." *Photonic Network Communications*, Vol.43, No. 3, pp.177-184, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11107-022-00977-9>
- [24] N. Kengo, T. Tanabe, A. Shinya, S. Matsuo, T. Sato, H. Taniyama, and M. Notomi. "Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic-crystal nanocavity." *Nature Photonics*, Vol. 4, No. 7, pp.477-483, 2010. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.89>
- [25] F. Qianqian, Y. Zhao, W. Yu, and J. Ge. "Electrically responsive photonic crystals with highly sensitive response and low power consumption for color displays." *Chemical Engineering Journal* 505, pp.159050, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.159050>
- [26] R. Rajasekar, K. Parameshwari and S. Robinson, Nano-optical switch based on photonic crystal ring resonator. *Plasmonics*, Vol. 14, No. 6, pp.1687-1697, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11468-019-00955-4>
- [27] A. Salmanpour, S. Mohammadnejad and A. Bahrami, Photonic crystal logic gates: an overview. *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 47, pp.2249-2275, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11082-014-0102-1>