

بهبود عملکرد دی‌مالتی‌پلکسر مبتنی بر بلور فوتونی با استفاده از دو خم ۹۰°

محمد اسدپور^۱، استادیار؛ مریم فرهنگ^۲، کارشناس ارشد؛ لادن اکبری^۳، دانشجوی دکتری؛ کامبیز عابدی^۴، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - m_asadpour@Tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه بناب - بناب - ایران - maryam.farhang_2008@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - l_akbari@sbu.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - k_abedi@sbu.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر افزاره‌های نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی، به دلیل ویژگی‌های جالب بلورهای فوتونی مانند تلفات ناچیز، سرعت گروه بسیار پایین، انعطاف‌پذیری در شکل و ابعاد و همچنین مناسب بودن برای مدارهای مجتمع در ابعاد نانو، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، با استفاده از بلورهای فوتونی دو بعدی، نحوه طراحی یکی از ضروری‌ترین عناصر مدارهای مجتمع نوری یعنی دی‌مالتی‌پلکسر تمام نوری بررسی شده است. برای این منظور ابتدا یک ساختار فوق‌العاده فشرده از دی‌مالتی‌پلکسرهای مبتنی بر تشدیدگرها مورد بررسی قرار گرفته و سپس با ایجاد دو خم ۹۰ درجه با مهندسی در ساختار میله‌های دیواره خم، با عملکرد بالا در کانال‌های خروجی، میانگین بازده انتقال توان در یکی از کانال‌ها ۹۴/۲۸٪ بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: بلورهای فوتونی، دی‌مالتی‌پلکسر، خم ۹۰ درجه، تشدیدگر.

Improvement of photonic crystal-based demultiplexer performance using two 90° bends

Mohammad Asadpour¹, Assistant Professor; Maryam Farhang², MSc; Ladan Akbari³, PhD student; Kambiz Abedi⁴, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: m_asadpour@Tabrizu.ac.ir

2- Faculty of Electrical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran, Email: maryam.farhang_2008@yahoo.com

3- Faculty of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran, Email: l_akbari@sbu.ac.ir

4- Faculty of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran, Email: k_abedi@sbu.ac.ir

Abstract: In recent years, optical devices based on photonic crystals have received much attention due to valuable features of photonic crystals such as low losses, very low group velocity, flexibility in shape and dimensions as well as being suitable for integrated circuits in Nano-scale. In this paper, using two-dimensional photonic crystals, the design of optical de-multiplexer as one of the most essential elements of integrated optical circuits, is investigated. For this purpose, an ultra-compact structure of resonator-based de-multiplexers is demonstrated and then by creating two high performance 90° bends along with engineering in the structure of bending wall rods at the output channels, transmission efficiency average 94.28% in one of the output channels has been obtained.

Keywords: Photonic crystals, Demultiplexer, 90° bend, Resonator.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

نام نویسنده مسئول: محمد اسدپور

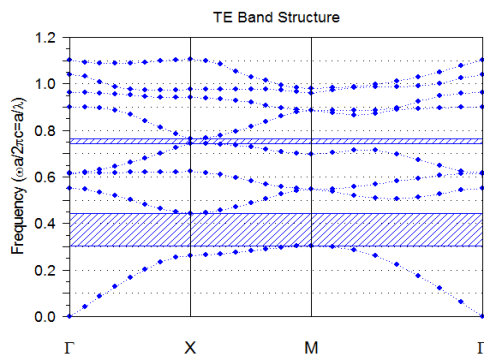
نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در این مقاله با الهام از تشدیدگر چندمودی طراحی شده در [۱۹] و نیز بکارگیری از خم‌های ۹۰ درجه با عملکرد بالا، یک دی‌مالتی‌پلکسر طول موج فوق‌فشرده پیشنهاد می‌شود و به بررسی پارامترهای اساسی آن نظیر بازده انتقال، فاصله کانالی، طول موج تشدید و ضریب کیفیت پرداخته می‌شود.

۲- مدل و روش

در حال حاضر مناسب‌ترین روش برای محاسبه شبیه‌سازی امواج الکترومغناطیسی در ساختارهای بلور فوتونی روش‌های عددی است. برای بدست آوردن ایده کلی راجع به مشخصات بلورهای فوتونی و همچنین طراحی مناسب افزاره‌هایی بر پایه بلورهای فوتونی به کارگیری ساختارهای باند بسیار مناسب است که برای محاسبه آن‌ها از روش بسط امواج تخت (PWE) استفاده می‌شود. سرعت محاسباتی بالا و نیز انجام محاسبات گاف ممنوعه در زمان کم، از مزایای این روش به شمار می‌رود. به منظور استخراج ساختار گاف ممنوعه بلورهای فوتونی در ساختار دی‌مالتی‌پلکسر پیشنهادی، محاسبات PWE توسط یکی از مهمترین ابزارهای شبیه‌ساز نرم‌افزار آرسافت ورژن ۵ بنام BandSolve انجام می‌گیرد. همچنین به منظور بررسی و شبیه‌سازی انتشار امواج الکترومغناطیسی در ساختار بلور فوتونی، از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) استفاده می‌گردد که در طرح پیشنهادی، محاسبه طیف‌های موردنظر توسط یکی از پرکاربردترین ابزارهای شبیه‌ساز نرم‌افزار آرسافت ورژن ۵ بنام FullWave صورت می‌گیرد.



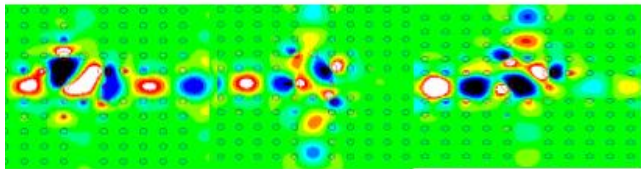
شکل ۱: ساختار باند بلور فوتونی بکار رفته برای طراحی دی‌مالتی‌پلکسر

۳- طراحی دی‌مالتی‌پلکسر

ساختار پایه به کار رفته برای طراحی دی‌مالتی‌پلکسر پیشنهادی توسط هو^۲ و لو^۲ [۲۱]، یک شبکه مربعی ۱۱×۱۱ از میله‌های سیلیکون می‌باشد که توسط هوا احاطه شده‌اند. ضریب شکست میله‌های دی‌الکتریک ۳/۴ و شعاع آن‌ها $a/18$ می‌باشد که a ثابت شبکه برابر با ۵۴۰ nm در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱، ساختار ارائه شده دارای دو گاف ممنوعه فوتونی در مد TE در بازه $0.302 < \omega a / 2\pi c < 0.445$ می‌باشد که ω فرکانس زاویه ای و c سرعت نور در خلا می‌باشد.

با توجه به پیشرفت روزافزون شبکه‌های مخابرات نوری، طراحی افزاره‌های تمام نوری مناسب برای یکپارچه‌سازی مدارهای نوری در میان محققان بسیار رایج شده است. یکی از چالش‌های بسیار مهم در طراحی افزاره‌های نوری فوق‌فشرده، حبس‌شدگی ضعیف نور در فضاهای کوچک می‌باشد که با پیدایش بلورهای فوتونی، تا حد زیادی برطرف گردیده است. بلورهای فوتونی به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر کنترل نحوه‌ی انتشار نور، سرعت عملکرد بالا، انعطاف‌پذیری و همچنین مناسب بودن برای مدارهای مجتمع در ابعاد نانو، گزینه مناسبی برای تحقق ادوات نوری فعال و غیرفعال به‌شمار می‌روند. بلورهای فوتونی ساختارهای متناوب در مقیاس نانو هستند که از دو ماده دی‌الکتریک با ضرایب شکست متفاوت تشکیل شده‌اند. در اثر تغییرات متناوب ضریب شکست، شکاف‌های باند فوتونی (PBG) در ساختار باند بلورهای فوتونی ایجاد می‌شود که در بازه‌ی خاصی از فرکانس‌ها، انتشار نور از داخل آن‌ها ممکن نیست. برای تغییر گاف ممنوعه‌ی فوتونی می‌توان با ایجاد نقص‌های نقطه‌ای (کاواک‌ها) و خطی (موجبرها) و یا هر دو، طول موج خاصی را از شبکه گذر داد. این مهم‌ترین روش، برای ساخت افزاره‌های فوتونی یکپارچه از قبیل فیلترها [۱]، دی‌مالتی‌پلکسرها [۲]، سوئیچ‌ها [۳]، کوپلرها [۴] و جداکننده‌های پرتو [۵] است. از آنجایی که دی‌مالتی‌پلکسرهای مبتنی بر بلور فوتونی از عناصر مهم و ضروری در مدارهای مجتمع فوتونی به‌شمار می‌روند، تاکنون روش‌های مختلفی نظیر موجبرهای نقص [۶]، اثرات ابرمنشور [۸، ۹]، کاواک‌های مزدوج [۱۰، ۱۱] تشدیدگرهای حلقوی [۱۲-۱۷] و غیره برای تحقق آن‌ها پیشنهاد شده است که در میان آن‌ها، ساختارهای مبتنی بر تشدیدگرهای حلقوی به‌لحاظ برخورداری از ویژگی‌هایی همچون مقیاس‌پذیری، انعطاف‌پذیری، کوک‌پذیری طیفی بالا، فاصله کانالی باریک و بازه طیفی آزاد و وسیع، توجهات زیادی را در طراحی‌ها به‌خود جلب کرده‌اند و دارای انواع مختلفی همچون مربعی، شبه مربعی، دایره‌ای، X شکل، الماسی شکل و ... می‌باشند.

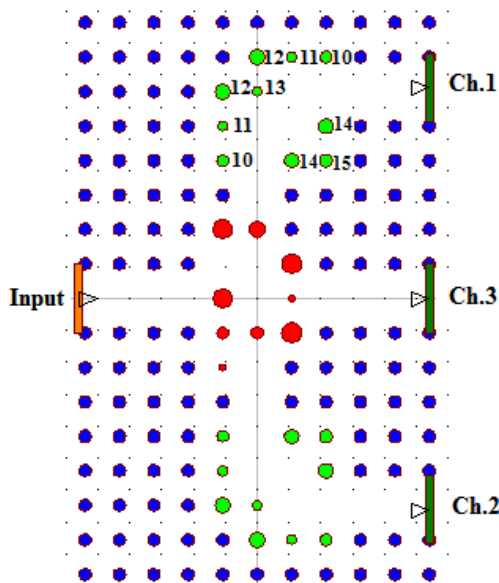
در حال حاضر، تمامی طراحی‌های انجام گرفته بر پایه‌ی تشدیدگرهای بلور فوتونی، به‌ازای هر فرکانس به یک تشدیدگر نیاز دارند. به‌عنوان مثال، فیلتر چهار کاناله طراحی شده توسط فن^۱ و همکارانش [۱۸] از دو میکروکاواک که دارای دو مود تبهگن در فرکانس‌های مطلوب هستند، تشکیل شده است. همچنین طرح‌های سه کاناله ارائه شده در [۱۹، ۲۰]، شامل یک رزوناتور در مقابل هر یک از موجبرهای خروجی است. در ساختار پیشنهادی توسط لیو^۲ و همکارانش [۱۴]، هر یک از موجبرهای خروجی به یک میکروکاواک و تمامی میکروکاواک‌ها به یک ناحیه‌ی تزویج مشترک متصل شده‌اند.



شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی در کانال‌های خروجی به‌ازای طول- موج‌های (الف) ۱۴۲۷ nm (ب) ۱۴۶۵ nm (پ) ۱۵۰۰ nm

۳-۱- ایجاد خم ۹۰ درجه در کانال‌های خروجی

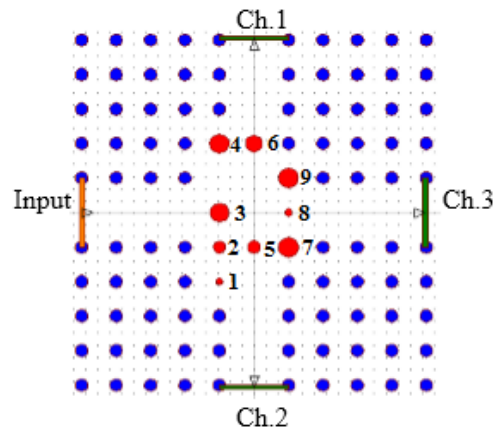
به‌منظور دستیابی به کانال‌های موازی و نیز ۹۹/۶٪ از توان ورودی، می‌توان از دو خم ۹۰ درجه در کانال‌های ۱ و ۲ استفاده نمود [۲۲]. با توجه به شکل ۵، در هر دو خم، ده میله با رنگ سبز وجود دارد که چهار جفت از آن‌ها دارای شعاع‌های یکسانی هستند، لذا شعاع میله‌ها به‌ترتیب از چپ به راست و از پایین به بالا برابر خواهد بود با $0.1696a$ ، $0.1508a$ ، $0.2170a$ ، $0.1413a$ ، $0.2154a$ و $0.1864a$ که به ترتیب با اعداد ۱۰ تا ۱۵ بر روی شکل مشخص شده‌اند. میله‌های با شماره‌های ۱۲ تا ۱۵ که در گوشه خم‌ها و میله‌های ۱۰ و ۱۱ در لبه مسیر موجبری قرار گرفته‌اند، میله‌های پراکنده‌کننده^۵ می‌باشند [۱۷، ۲۳-۲۵] که موجب کاهش تلفات انتشار می‌شوند.



شکل ۵: ایجاد خم ۹۰ درجه در کانال‌های خروجی دی‌مالتی‌پلکسر

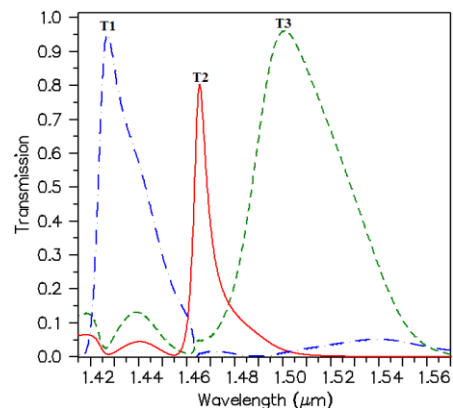
طیف توان خروجی مربوط به ساختار شکل ۵ در شکل ۶ نشان داده شده است. با مقایسه نمودار انتقال شکل ۶ با نمودار انتقال شکل ۳ متناظر با ساختار شکل ۲ مشاهده می‌شود که توان و بازده توان منتقل شده به سه کانال با اعمال خم ۹۰ درجه، بهبود یافته است.

مطابق شکل ۲، ساختار دی‌مالتی‌پلکسر ارائه شده از سه قسمت موجبر ورودی، تشدیدگر و موجبر خروجی تشکیل شده است.



شکل ۲: دی‌مالتی‌پلکسر سه کاناله طراحی شده توسط Lu و Hu

در طراحی ساختار فوق از یک تشدیدگر با میله‌های دارای شعاع $0.097a$ ، $0.1688a$ ، $0.2698a$ ، $0.2793a$ ، $0.1843a$ ، $0.2389a$ ، $0.2939a$ ، $0.1024a$ و $0.2823a$ به‌ترتیب از پایین به بالا و از چپ به راست و با اعداد ۱ تا ۹ بر روی شکل نشان داده شده‌اند. طیف توان خروجی مربوط به ساختار فوق در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طیف توان خروجی مربوط به ساختار شکل ۲

با توجه به منحنی‌های فوق، ماکزیمم مقدار توان خروجی‌ها در طول موج‌های ۱۴۶۵ nm، ۱۴۲۷ nm و ۱۵۰۰ nm به‌ترتیب برابر است با $T_3=0.9598$ و $T_2=0.8021$ ، $T_1=0.9442$.

با اعمال پالس گاوسی با قطبش TE به کانال ورودی، شدت میدان الکتریکی در خروجی‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که توان انتقالی به کانال T1 و T2 نسبت به کانال T3 کمتر می‌باشد. بنابراین در طراحی، برای افزایش توان و بازده انتقالی به کانال‌های ۱ و ۳ از خم ۹۰ درجه استفاده می‌شود.

مطابق فرمول $X_{t_{ij}} = \frac{1}{1-k} \sum_{m=1}^k (10 \cdot \log(\frac{P_m}{P_n}))$ حاصل می‌شود که در آن k بیانگر تعداد کانال‌ها، P_n توان ورودی و P_m توان خروجی کانال‌ها تحت تاثیر اثر تداخلی کانال‌های مجاور می‌باشد. مقادیر هم‌نشوایی بین کانال‌ها در جدول ۲ مقایسه شده است.

جدول ۲: مقادیر هم‌نشوایی بین کانال‌ها

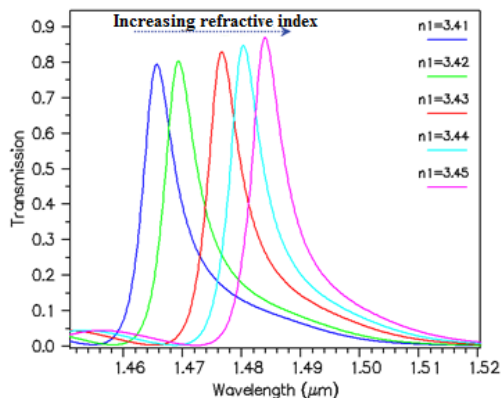
$X_{t_{ij}}$ (dB)	۱	۲	۳
۱	-	-۲۱/۳	-۱۴/۴۷
۲	-۲۵/۱۵	-	-۱۲/۶۴
۳	-۱۷	-۱۸/۶۴	-

۴- بحث و نتایج

برای بررسی عملکرد افزاره پیشنهادی، اثر تغییر ضریب شکست میله‌ها و همچنین تغییر ثابت شبکه از طریق شبیه‌سازی و مشاهده تغییر رفتار در نمودار انتقال آن در بخش‌های ۴-۱ و ۴-۲ ارائه می‌شود.

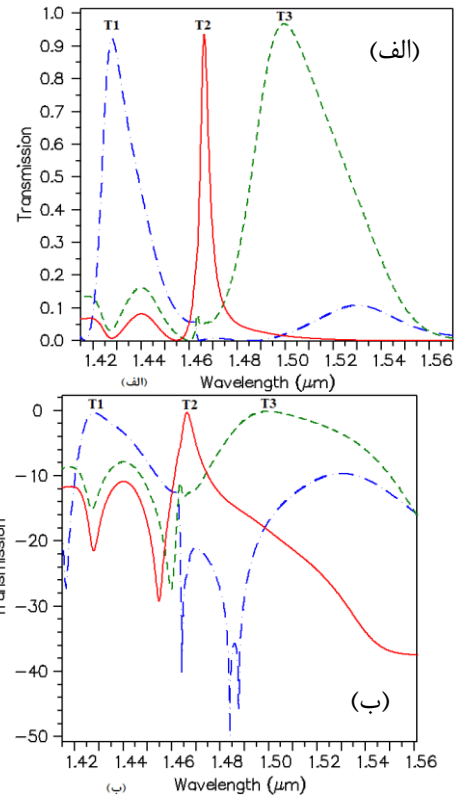
۴-۱- اثر تغییرات ضریب شکست میله‌ها

با افزایش ضریب شکست میله‌ها، ضریب شکست کلی ساختار نیز افزایش می‌یابد. این پدیده موجب حرکت نوارهای فوتونی ساختار باند به سمت طول موج‌های بالاتر، می‌شود. در شکل ۷، پنج منحنی متفاوت به‌ازای ضرایب شکست ۳/۴، ۳/۴۱، ۳/۴۲، ۳/۴۳، ۳/۴۴ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضریب شکست، علاوه بر شیفت طول موج تشدید ۱۴۶۶ nm به سمت مقادیر بزرگ‌تر، ماکزیمم مقدار توان انتقالی هم افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۷: طیف انتقالی ساختار به ازای ضرایب شکست مختلف

افزایش طول موج‌ها با افزایش ضریب شکست میله‌ها، به علت تناوب حاکم بر ساختارهای مبتنی بر بلور فوتونی با برقراری شرط براگ $m\lambda = 2a \cdot \cos \theta$ که در آن θ زاویه تابش نور بر سطح و $a = nd$ (n ضریب شکست و d فاصله مرکز میله‌ها از هم) بوده، می‌باشد. رابطه خطی جابه‌جایی طول موج تشدید به‌ازای تغییرات ضریب شکست در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۶: طیف توان خروجی مربوط به دی‌مالتی‌پلکسر سه‌کاناله دارای دارای خم ۹۰° (الف) مقیاس خطی (ب) مقیاس دسی‌بل

نتایج حاصل از شبیه‌سازی شامل طول موج مرکزی، بازده توان انتقالی، پهنای باند که در مقیاس خطی نمودار انتقال، برابر تفرق دو طول موج متناظر با دو نقطه تقاطع خط عبوری از ۰/۵ در نمودار انتقال با هر یک از نمودار انتقال کانال‌ها است با رابطه $B = (\pi \times FWHM) / 180$ و ضریب کیفیت که نسبت طول موج تشدید بر نصف ماکزیمم کل طول موج $(Q = \lambda / FWHM)$ مربوط به هر یک از کانال‌ها می‌باشد، به‌صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

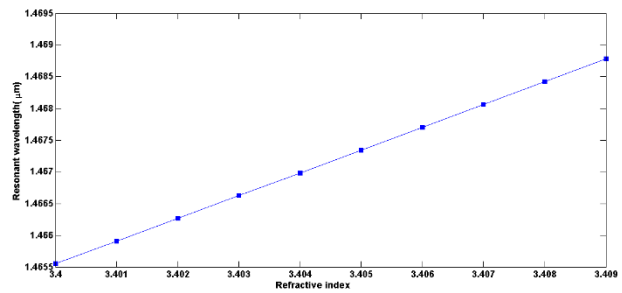
مشاهده می‌شود که با افزایش پهنای باند، ضریب کیفیت کاهش می‌یابد. همچنین بالاترین مقدار بازده توان در طول موج مرکزی بالاتر مربوط به کانال سوم با زاویه خم صفر درجه می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای مهم دی‌مالتی‌پلکسر

کانال	طول موج مرکزی (nm)	پهنای باند (nm)	ضریب کیفیت	بازده توان انتقالی
۱	۱۴۲۸	۱۶/۲	۸۸/۱	۹۲/۴۷٪
۲	۱۴۶۶	۴/۹	۲۹۹/۱	۹۳/۶۴٪
۳	۱۵۰۰	۴۲/۴	۳۵/۳۷	۹۶/۷۵٪

وقتی سطح قدرت نور به حدی برسد که بر اثر پدیده‌های غیرخطی بین کانال‌ها تداخل ایجاد شود، پدیده‌ی هم‌نشوایی $(X_{t_{ij}})$ [۲۶، ۱۷] به‌وجود می‌آید. محاسبه هم‌نشوایی بین کانال‌ها

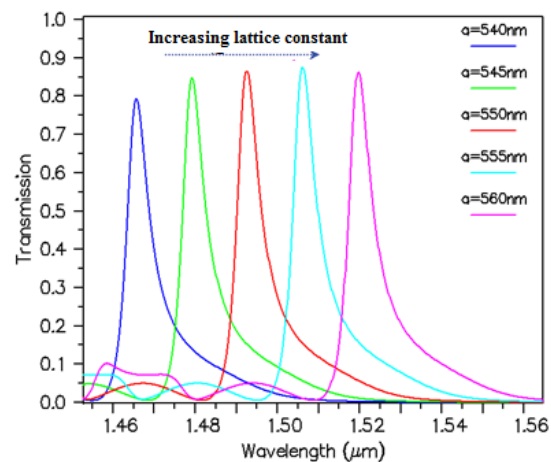
- interferometer arm: based on 2D photonic crystals," *Applied Optics*, vol.47, no. 27, pp. 5041-5050, 2008.
- [4] Kosmidou, E.P., E.E. Kriezis, and T.D. Tsioukas, "Analysis of tunable photonic crystal directional couplers," *Journal of Applied Physics*, vol. 100, no. 4, pp. 043118, 2006.
- [5] Wan, Y., et al., "1 × 3 Beam splitter based on self-collimation effect in two-dimensional photonic crystals," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 122, no. 4, pp. 337-339, 2011.
- [6] Akosman, A.E., et al., "Compact wavelength de-multiplexer design using slow light regime of photonic crystal waveguides," *Optics Express*, vol. 19, no. 24, pp. 24129-24138, 2011.
- [7] Zhang, X., et al., "Novel ultracompact wavelength division demultiplexer based on photonic band gap," *Optics Communications*, vol. 285, no. 3, pp. 274-276, 2012.
- [8] Chung, K.B. and S.W. Hong, "Wavelength demultiplexers based on the superprism phenomena in photonic crystals," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 9, pp. 1549-1551, 2002.
- [9] Jugessur, A.S., et al., "Compact and integrated 2-D photonic crystal super-prism filter-device for wavelength demultiplexing applications," *Optics Express*, vol. 14, no.4, pp. 1632-1642, 2006.
- [10] Martinez, A. and J. Bravo-Abad, "Wavelength Demultiplexing Structure Based on Coupled-Cavity Waveguides in Photonic Crystals," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 22, no. 3, pp. 151-160, 2003.
- [11] Liu, W., et al., "Optimization transmission of photonic crystal coupled cavity and design of demultiplexer for wavelength division multiplexing application," *Optical Engineering*, vol. 51, no. 8, pp. 084002-1-084002-6, 2012.
- [12] Ren, H., et al., "Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity," *Optics Express*, vol. 14, no. 6, pp. 2446-2458, 2006.
- [13] Kuo, C.-W., et al., "A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures," *Optics Express*, vol. 15, no. 1, pp. 198-206, 2007.
- [14] Liu, V., et al., "Design methodology for compact photonic-crystal-based wavelength division multiplexers," *Optics Letters*, vol. 36, no. 4, pp. 591-593, 2011.
- [15] Ren, H., et al., "Photonic Crystal Three-Port Channel Drop Filter Based on One-Way Waveguide," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 332-334, 2012.
- [16] Nikhil Deep Gupta, Vijay, "Dense wavelength division demultiplexing using photonic crystal waveguides based on cavity resonance," *Optik*, vol. 125, pp. 5833-5836, 2014.
- [17] Kannaiyan, V., Savarimuthu, R. and Dhamodharan, S. K., "Investigation of 2D- photonic crystal resonant cavity based WDM demultiplexer," *Opto-Electronics Review*, vol. 26, pp.108-115, 2018.
- [18] Fan, S., et al., "Channel Drop Tunneling through Localized States," *Physical Review Letters*, vol. 80, no. 5, pp. 960-963, 1998.
- [19] Sharkawy, A., S. Shi, and D.W. Prather, "Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals," *Applied Optics*, vol. 40, no. 14, pp. 2247-2252, 2001.
- [20] Kim, S., et al., "Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters of three-port system with reflection feedback," *Optics Express*, vol. 12, no. 22, pp. 5518-5525, 2004.
- [21] Hu, Z. and Y.Y. Lu, "Compact wavelength demultiplexer via photonic crystal multimode resonators," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 31, no. 10, pp. 2330-2333, 2014.
- [22] Hu, Z. and Y.Y. Lu, "Improved bends for two-dimensional photonic crystal waveguides," *Optics Communications*, vol. 284, no. 12, pp. 2812-2816, 2011.
- [23] Danaie, M., et al., "Design of a High-Bandwidth Y-Shaped Photonic Crystal Power Splitter for TE Modes," *International Journal of Optics and Photonics (IJOP)*, vol. 12, no. 1, 2018.



شکل ۸: تغییرات طول موج به ازای ضرایب شکست متفاوت میله‌ها

۴-۲- اثر تغییرات ثابت شبکه

متطابق شکل ۹، با افزایش جزئی ثابت شبکه به میزان ۵ nm، طول موج تشدید به مقدار ۱۳/۵ nm افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۹: طیف انتقالی ساختار به ازای مقادیر مختلف ثابت شبکه

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور بهبود بازده توان انتقالی دی‌مالتی‌پلکسر مبتنی بر تشدیدگر چندمودی در کانال‌های خروجی از خم‌های ۹۰° با عملکرد بالای ۹۹/۶٪ در یکی از کانال‌ها استفاده شده است. در این ساختار میانگین بازده توان انتقالی و هم‌سنوایی بین کانال‌های مجاور به ترتیب ۹۴/۲۸٪ و ۱۸/۲ dB- بدست آمده است. همچنین ساختار پیشنهادی برای برخورداری از مساحت ۵۴/۵ μm² برای اهداف مجتمع‌سازی نیز بسیار مطلوب می‌باشد.

مراجع

- [1] Guan, H., et al., "Analysis and optimization of a new photonic crystal filters in near ultraviolet band," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 123, no. 20, pp. 1874-1878, 2012.
- [2] Momeni, B., et al., "Compact wavelength demultiplexing using focusing negative index photonic crystal superprisms," *Optics Express*, vol. 14, no. 6, pp. 2413-2422, 2006.
- [3] Mansouri-Birjandi, M.A., M.K. Moravvej-Farshi, and A. Rostami, "Ultrafast low-threshold all-optical switch implemented by arrays of ring resonators coupled to a Mach-Zehnder

- [26] Elfaki, S., and Abdel Kareem, A., "Crosstalk Reduction Algorithms Codes in Multiplexer-Demultiplexer Based Array Waveguide Grating in Dense Wavelength Division Multiplexing," *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, vol. 5, no. 7, pp. 16-21, 2014.
- [24] Kaatuzian, H. "Simulation and Design of a Low Crosstalk Hexagonal Photonic Crystal Crossover Waveguide," *Optics and Photonics Journal*, vol. 3, pp. 209-211, 2013.
- [25] Kumar, R. A., et al., "Design and Simulation of Effective 90 Bend Waveguide Based on Hexagonal Lattice Photonic Crystal," *IEEE Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER)*, 2018.

زیر نویس‌ها

- ⁴ Lu
⁵ Scatterer rod
⁶ FWHM

- ¹ Fan
² Liu
³ Hu