

طراحی دی‌مالتی‌پلکسر نوری دو کاناله مبتنی بر نانوتشدیدگر حلقوی کریستال فوتونی دو بعدی با هم‌سینوایی بسیار کم و ضریب کیفیت بالا

غلامعلی دلفی^۱ سعید علیائی^۲ محمود صیفوری^۳ احمد محب‌زاده بهابادی^۴

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

s_olyaee@sru.ac.ir

۲- استاد- آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

alisat20020@gmail.com

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

mahmood.seifouri@sru.ac.ir

۴- دانشجوی دکتری- آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

a.moheb@sru.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک دی‌مالتی‌پلکسر دو کاناله مبتنی بر نانوتشدیدگر حلقوی کریستال فوتونی طراحی و شبیه‌سازی شده است. ساختار این دی‌مالتی‌پلکسر از دو فیلتر کریستال فوتونی تشکیل شده است. در ابتدا فیلتر کریستال فوتونی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این تجزیه و تحلیل با انجام تغییرات شعاع میله‌های مرکزی نانوتشدیدگر حلقوی و شعاع میله‌های پراکندگی، پارامترهای مهم در طراحی فیلتر بهبود یافته است. میانگین ضریب کیفیت $3506/9$ ، میانگین ضریب انتقال $94/3\%$ ، میانگین میزان هم‌سینوایی $25/35$ - دسی‌بل و میانگین عرض کانالی $0/45$ نانومتر، از مزیت‌های این ساختار است. علاوه بر این، سادگی ساختار و اندازه کوچک از ویژگی‌های ساختار به حساب می‌آید و می‌توان از ساختار پیشنهاد شده در سامانه‌های WDM بهره برد.

واژه‌های کلیدی: کریستال فوتونی، شکاف باند فوتونی، فیلتر کریستال فوتونی، دی‌مالتی‌پلکسر، نانوتشدیدگر حلقوی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.4.51

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سعید علیائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - لویزان - دانشگاه شهید رجایی - دانشکده برق - آزمایشگاه تحقیقاتی نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک

۱- مقدمه

در حال حاضر ادوات نوری یکی از نیازهای اولیه در عرصه مخابرات و الکترونیک به حساب می‌آید. با توجه به اینکه ادوات نوری اطلاعات را با سرعت خیلی بیشتر و پهنای باند بهتری می‌توانند انتقال دهند، بنابراین کریستال‌های فوتونی به‌خاطر ویژگی‌های منحصر به‌فردشان توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است. کریستال‌های فوتونی گزینه‌های خوبی در آینده برای طراحی مدارهای مجتمع نوری و سامانه‌های ارتباطی نوری (WDM) هستند. این ساختارها دارای شکاف باند فوتونی و حبس قوی نور هستند. شکاف باند فوتونی به ناحیه‌ای از ساختار کریستال فوتونی گفته می‌شود که هر طول‌موجی توانایی و اجازه انتشار را ندارد و در اصطلاح به آن باند فوتونی ممنوعه می‌گویند [۱-۳]. سامانه WDM به دو دسته CWDM و DWDM تقسیم می‌شود که بر اساس استاندارد LTU-T (۶۹۵-۶۹۴) و G-۶۹۴، سیستم CWDM دارای پهنای باند ۱۶۱۰-۱۲۷۰ و فاصله هوایی بین طول‌موج ۲۰ نانومتر و عرض کانال ۱۸ نانومتر و سیستم DWDM دارای فاصله هوایی بین طول‌موجی کمتر از ۱/۰ نانومتر و پهنای باند ۱۵۶۵-۱۵۲۵ نانومتر با بیش از یک‌صد کانال است [۴-۵]. شکاف باند فوتونی یک عامل کلیدی برای طراحی اجزاء مختلف مبتنی بر کریستال فوتونی مانند کلیدهای نوری، فیلترها، مالتی‌پلکسر، دی-مالتی‌پلکسر و موج‌برها است. در جهت تحلیل شکاف باند فوتونی در ساختارهای کریستال فوتونی می‌توان از روش بسط موج تخت (PWE) استفاده کرد. همچنین محاسبات در ساختارهای دی‌مالتی‌پلکسرهای نوری، روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) این امکان را به وجود آورده که بتوان به‌راحتی شبیه‌سازی انتشار امواج الکترومغناطیسی را در طراحی‌های با ابعاد بسیار کوچک پیاده‌سازی کرد [۴-۷].

در کریستال‌های فوتونی انتخاب شعاع میله‌های دی‌الکتریک و ثابت شبکه دی‌الکتریک در تشکیل شکاف باند فوتونی و طول‌موج‌های مجاز یک ساختار کریستال فوتونی حائز اهمیت است. به این طریق می‌توان توان ورودی پرتو نور را تحت تاثیر قرار داد و از پراکندگی نور جلوگیری کرد [۸]. این ساختارها در افزاره‌های نوری متفاوت کارایی دارد و تا به حال افزاره‌ها گوناگونی مبتنی بر کریستال‌های فوتونی ارائه شده است [۱۰-۷]. به‌خصوص در مالتی‌پلکسرها و دی‌مالتی-پلکسرها و فیلترهای نوری کریستال فوتونی با به دام انداختن نور در ساختار یک کاواک و حلقه‌های تشدیدگر توسط شکاف باند فوتونی می‌توان طول‌موج‌های مورد انتظار را گزینش نمود [۱۱]. فیلترهای فزون/فرد عملکرد دیگری از کریستال‌های فوتونی هستند که بین دو موجبر ورودی و خروجی قرار می‌گیرند و باعث تغییر نور ورودی شده و با محبوس کردن نور، توانایی افزایش و کاهش طول موج‌های جدید در خروجی یک طراحی ساختار را دارند. از این افزایش و کاهش سریع نور می‌توان به‌عنوان یک مزیت کلیدی در مدارات مجتمع نوری استفاده

کرد. چنین عملکردی با یک توان نوری ورودی چند میکرووات امکان‌پذیر است. از طراحی یک فیلتر می‌توان در طراحی ساختارهای دی-مالتی‌پلکسر و دیگر افزاره‌های نوری استفاده نمود. فیلتر فزون/فرد که در سال ۲۰۱۶ طراحی شده قابلیت واکنش سریع، مصرف کم انرژی و قابلیت ادغام به چندین کانال ارتباطی و همچنین قابلیت تنظیم در حالت غیرخطی را دارد و کمترین توان نور مورد نیاز برای روشن و خاموش شدن را لازم دارد [۱۲]. فیلتر دیگری مبتنی بر نانوتشدیدگر حلقوی کریستال فوتونی در سال ۲۰۱۸ با ضریب کیفیت ۱۲۹۰ و طول‌موج مرکزی ۱۵۴۸ نانومتر و ضریب انتقال ۹۵٪ طراحی شده است [۱۳]. تا به حال طراحی انواع دی‌مالتی‌پلکسرهای نوری نانو تشدیدگر خطی و نقطه‌ای توسط پژوهشگران متعددی صورت گرفته است. اما در عمده آنها نتایج خوبی از ضریب کیفیت و شدت انتقال توان گزارش نشده است. به منظور جبران این نقص، دی‌مالتی‌پلکسرهای با نانو تشدیدگر حلقوی پیشنهاد می‌شود. در سال ۲۰۱۳ دی‌مالتی‌پلکسر ۴ کاناله نانو تشدیدگر کریستال فوتونی x-شکل ارائه شد که در آن بیشترین ضریب کیفیت ۱۹۵۴ و کمترین و بیشترین هم‌نشوایی بین-کانال به ترتیب ۲۳/۷- و ۷/۵- دسی‌بل و فاصله بین کانالی ۳ نانومتر به دست آمده است [۱۴]. در سال ۲۰۱۵ یک دی‌مالتی‌پلکسر دو کاناله x-شکل با فاصله بین کانالی ۴ نانومتر و طول‌موج مرکزی کانال اول ۱۵۵۵/۷ نانومتر و کانال دوم ۱۵۵۱/۳ نانومتر و کمترین هم‌نشوایی بین کانالی ۱۶- دسی‌بل و بیشترین هم‌نشوایی بین کانالی این ساختار ۱۱- دسی‌بل، گزارش شده است [۱۵]. در سال ۲۰۱۶ تحقیق دیگری در مورد یک دی‌مالتی‌پلکسر ۴ کاناله نانوتشدیدگر حلقوی با ساختار هندسی گزارش شده که کمیت‌هایی چون فاصله بین کانالی حدود ۳ نانومتر و کمترین بازده انتقال ۹۲٪ و ضریب کیفیت بیش از ۸۱۸ و هم‌نشوایی کانالی ۱۸- دسی‌بل از آن نتیجه شده است [۱۶]. در این مقاله که یک دی‌مالتی‌پلکسر شش ضلعی چهار کاناله تشدیدگر حلقوی است که در سال ۲۰۱۷ انجام گرفته است و از این مقاله متوسط ضریب کیفیت ۱۹۴۳ و فاصله بین کانالی ۲ نانومتر و مقدار هم‌نشوایی بین کانالی ۱۸/۱۱- دسی‌بل و متوسط ضریب انتقال توان ۹۵٪ نتیجه شده است [۱۷]. یک دی‌مالتی‌پلکسر ۱۶ کاناله‌ای مبتنی بر نانوتشدیدگر حلقوی کریستال فوتونی دو بعدی طراحی شد. که دارای متوسط ضریب کیفیت ۵۱۷۶، ضریب انتقال توان ۹۹٪ و عرض کانال ۰/۳ نانومتر و هم‌نشوایی بین کانالی آن بین ۱۹- دسی‌بل و ۹۰- دسی‌بل است [۱۸].

از طرف دیگر دی‌مالتی‌پلکسرهای نوری نانوتشدیدگر حلقوی کریستال فوتونی قابلیت بیشتری در طراحی دارند و نتایج خوبی در پارامترهای خروجی‌شان مثل ضریب کیفیت، ضریب انتقال توان، میزان هم‌نشوایی و فاصله بین کانالی در سامانه‌های WDM دارند.

در این مقاله با استفاده از حلقه تشدیدگر کریستال فوتونی یک فیلتر و دی‌مالتی‌پلکسر دو کاناله طراحی و شبیه‌سازی شده است که

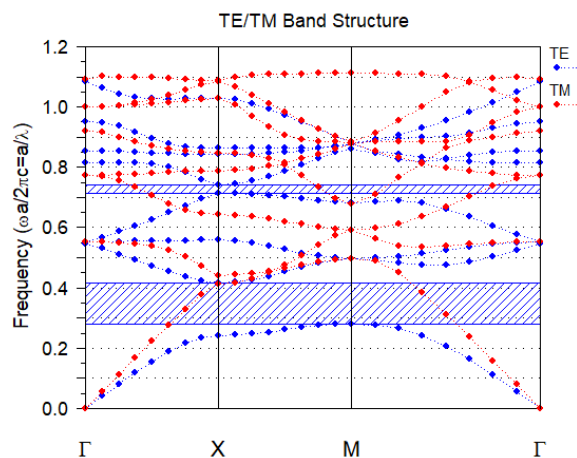
ساختار آن از یک موجبر ورودی T شکل، دو حلقه تشدیدگر مربعی شکل و دو موجبر خروجی تشکیل شده است.

۲- طراحی فیلتر نانو تشدیدگر حلقوی کریستال فوتونی

برای طراحی فیلتر، یک شبکه کریستال فوتونی دو بعدی با ساختاری مربعی شکل در نظر گرفته شده است. جنس میله‌های دی الکتریکی سیلیکون با ضریب شکست $3/46$ در بستری از هوا با ضریب شکست $1/0$ است. شعاع میله‌های دی الکتریکی برابر با 119 نانومتر ($R = a \times 0/20$) و ثابت شبکه ساختار کریستال فوتونی برابر با ($a = 595$) نانومتر است.

در ابتدا شکاف باند فوتونی محاسبه شده است. شکاف باند، طول موج‌های ممنوعه برای انتشار در شبکه کریستال فوتونی را بیان می‌کند. برای محاسبه این نمودار از روش بسط موج صفحه‌ای (PWE) استفاده شده است. نمودار شکاف باند فوتونی در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، برای قطبش TM شکاف باند فوتونی وجود ندارد و برای قطبش‌های TE دو شکاف باند فوتونی وجود دارد. این دو شکاف باند به صورتی است که یکی محدوده بزرگتری را در بر می‌گیرد و دیگری محدوده‌ای کوچک را پوشش می‌دهد. فرکانس‌های به‌هم‌جاری‌شده برای مود TE (واقعی) در شکاف باند فوتونی بزرگتر بین $0/279$ تا $0/416$ و برای شکاف باند کوچکتر بین $0/713$ تا $0/741$ است. با توجه به ثابت شبکه 595 نانومتر در این ساختار طول موج‌های متناظر با شکاف باند بزرگتر بین 2132 – 1430 نانومتر و شکاف باند کوچکتر بین 834 – 802 نانومتر هستند.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{\lambda_1} < \frac{a}{\lambda} < \frac{a}{\lambda_2} \\ \frac{a}{\lambda_1} < \frac{a}{\lambda} < \frac{a}{\lambda_2} \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} 0.279 < \frac{a}{\lambda} < 0.416 \\ 0.713 < \frac{a}{\lambda} < 0.741 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} 0.595 < \lambda < 0.595 \\ 0.416 < \lambda < 0.279 \\ 0.595 < \lambda < 0.713 \\ 0.741 < \lambda < 0.713 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} 1.430 < \lambda < 2.132 \\ 0.802 < \lambda < 0.834 \end{array} \right. \quad (1)$$

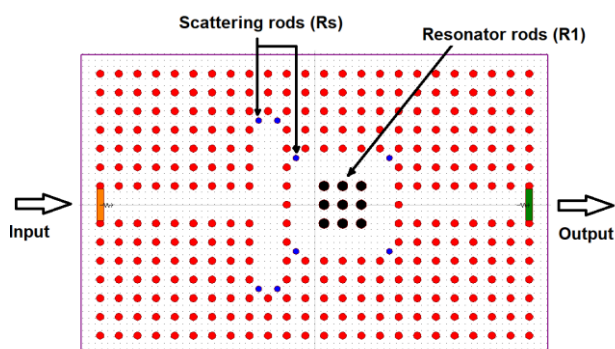


شکل (۱): نمودار شکاف باند فوتونی در قطبش‌های TE و TM، برای ساختار کریستال فوتونی که ثابت شبکه آن برابر 595 نانومتر و شعاع میله‌های دی الکتریک 119 نانومتر است

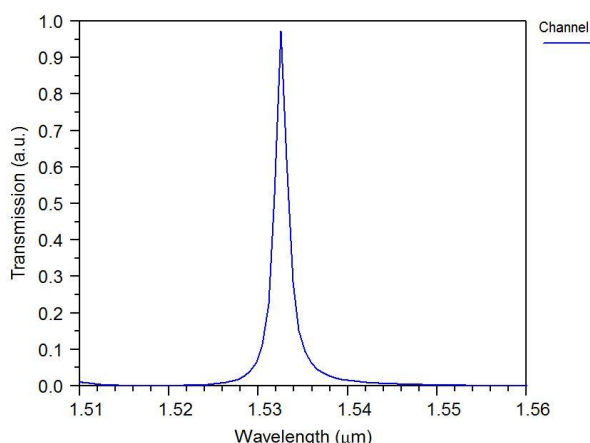
در شکل (۲) ساختار پیشنهادی برای فیلتر کریستال فوتونی مبتنی بر نانو تشدیدگر حلقوی آورده شده است. شبکه کریستال فوتونی شامل 15 ردیف و 24 ستون از میله‌های دی الکتریک است. فیلتر کریستال فوتونی طراحی شده با استفاده از یک حلقه نانو تشدیدگر به شکل مربع و دو موجبر طراحی شده است. حلقه نانو تشدیدگر هم با حذف یک حلقه مربع شکل و تغییر اندازه شعاع میله‌های دی الکتریک در حلقه‌های میانی آن شکل گرفته است. در ساختمان این فیلتر از میله‌های پراکندگی جهت بهبود حبس نور و بالا بردن ضریب کیفیت و ضریب انتقال توان استفاده شده است. برای به دست آوردن ساختار بهینه، اندازه این میله‌های پراکندگی جاروب شده است و بهترین اندازه برای عملکرد بهینه فیلتر انتخاب شده است. شعاع میله‌های دی الکتریک مرکز نانو تشدیدگر ($R_1 = a \times 0/275$) و شعاع میله‌های پراکندگی ($R_s = a \times 0/18$) در نظر گرفته شده است.

۳- تحلیل شعاع میله‌های پراکندگی و میله‌های مرکزی نانو تشدیدگر در ساختار فیلتر

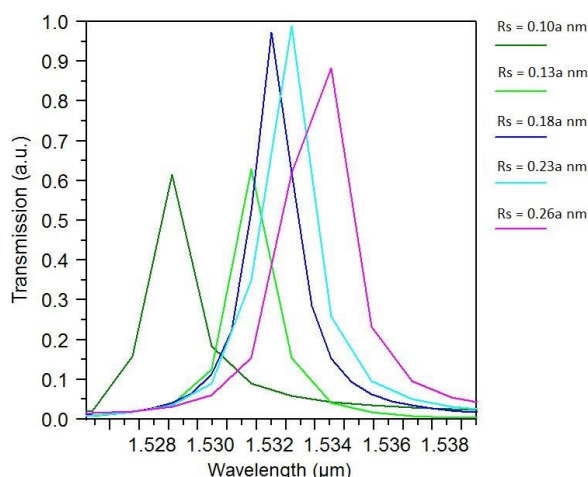
میله‌های پراکندگی در این فیلتر در جهت جلوگیری از پراکندگی شدن نور در میله‌های ساختار است. نکته مهمی که در مورد میله‌های پراکندگی در طراحی نانو تشدیدگرهای حلقوی باید مورد توجه قرار گیرد، انتخاب شعاع مناسب و بهینه برای آنها است. این فیلتر به ازاء مقادیر $(0/1, 0/13, 0/18, 0/23, 0/26)$ برابر ثابت شبکه برای شعاع میله‌های پراکندگی (R_s) مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و پارامترهای مهم در عملکرد فیلتر محاسبه شد. در شکل (۳) خروجی فیلتر به ازاء شعاع‌های مختلف از میله‌های پراکندگی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، بهترین حالت در ($R_s = a \times 0/18$) است. در این شعاع برای میله‌های پراکندگی بیشترین ضریب انتقال توان و ضریب کیفیت از طول موج مرکزی فیلتر به دست آمده است. در این فیلتر طول موج $1532/7$ نانومتر، (رنگ آبی) مقدار مناسب‌تری است.



شکل (۲): ساختار فیلتر کریستال فوتونی مبتنی بر حلقه تشدیدگر پیشنهاد شده به منظور استفاده در دی‌مالتی پلکسر نوری



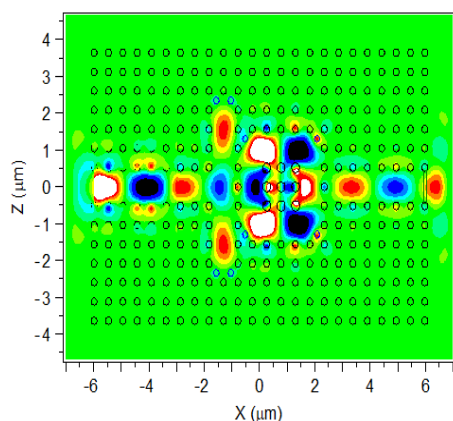
شکل (۵): خروجی فیلتر با طول موج ۱۵۳۲/۷ نانومتر



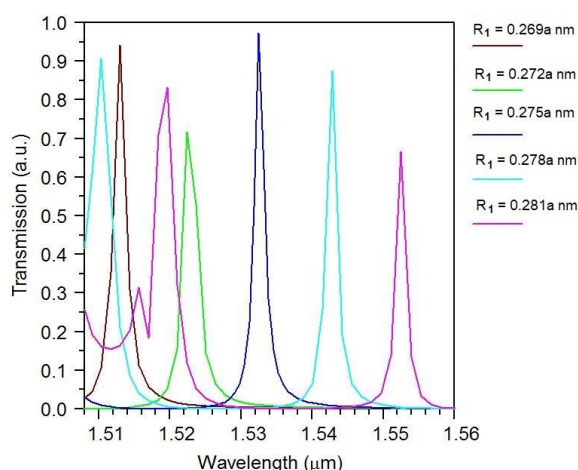
شکل (۳): تغییرات طول موج‌های خروجی و شدت انتقال بر حسب شعاع میله‌های پراکندگی

۴- طراحی دی‌مالتی پلکسر دو کاناله

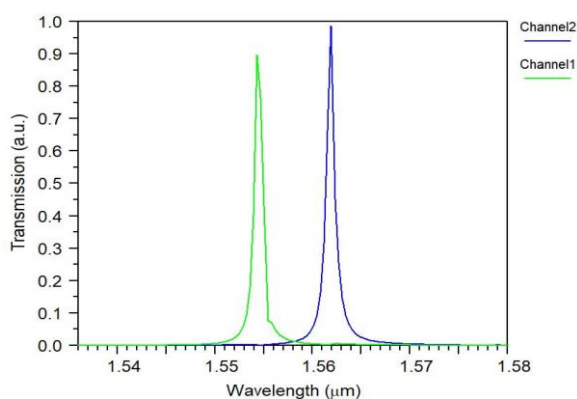
برای طراحی دی‌مالتی پلکسر دو کاناله از فیلتر طراحی شده در شکل (۲) استفاده شده است. ساختار کریستال فوتونی پایه استفاده شده برای طراحی دی‌مالتی پلکسر دو کاناله یک شبکه تناوبی شامل تعداد 24×21 میله و به اندازه $(13/92 \times 12/18)$ میکرومتر انتخاب شده است. در این ساختار از دو نانو تشدیدگر حلقوی به عنوان دو فیلتر که کار گزینش طول موج خروجی را انجام می‌دهند، استفاده شده است. در این تشدیدگرهای حلقوی از میله‌هایی با شعاعی غیر از شعاع میله‌های اصلی استفاده شده است. این تغییرات در شعاع میله‌ها و ثابت شبکه یکسان، باعث شده میزان تفکیک طول موج‌ها و جداسازی این طول موج‌ها در خروجی با قدرت و دقت بیشتری صورت گیرد. شعاع میله‌های نانو تشدیدگر حلقوی اول، $0/273$ ثابت شبکه، شعاع میله‌های نانو تشدیدگر حلقوی دوم، با اختلاف یک نانومتر از شعاع میله‌های نانو تشدیدگر اول $(58 \times 0/273 + 1/00)$ انتخاب شده است. همچنین از ۱۲ میله پراکندگی برای محبوس کردن و هدایت بهتر نور استفاده شده است؛ که شعاع این میله‌ها $0/18$ ثابت شبکه است.



شکل (۶): رفتار میدان الکترومغناطیسی فیلتر در طول موج ۱۵۳۲/۷ نانومتر



شکل (۴): تغییرات طول موج‌های خروجی و شدت انتقال بر حسب شعاع میله‌های مرکزی حلقه نانو تشدیدگر



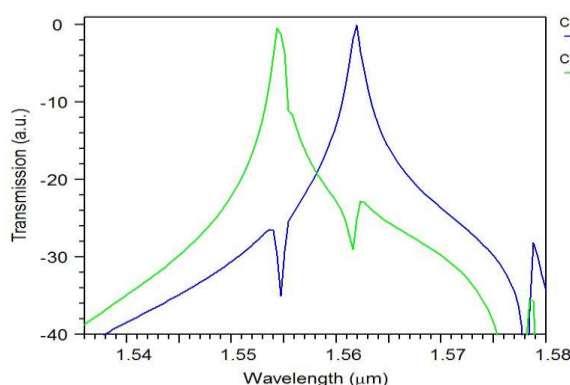
شکل (۹): کانال ۱ با طول موج ۱۵۶۱/۹ نانومتر و کانال ۲ با طول موج ۱۵۵۴/۵ نانومتر

در شکل (۹) خروجی‌های دو کانال نشان داده شده است. طول موج خروجی در کانال اول که با رنگ سبز نشان داده شده، ۱۵۵۴/۵ نانومتر و طول موج در کانال دوم ۱۵۶۱/۹ نانومتر که با رنگ آبی مشخص شده است. با توجه به عرض کانال ۰/۵ برای کانال اول، میزان ضریب کیفیت در این کانال مقدار ۳۱۰۹ به دست آمده است. در کانال دوم با توجه به عرض ۰/۴ نانومتر مقدار ضریب کیفیت ۳۹۰۴/۷۵ است. میزان شدت ضریب انتقال در کانال اول ۸۹/۹٪ و در کانال دوم ۹۸/۸٪ شده است. در جدول (۱) طول موج‌های مرکزی، عرض کانال، ضریب کیفیت و ضریب انتقال توان به تفکیک هر یک از کانال‌ها گزارش شده است.

جدول (۱): نتایج شبیه‌سازی

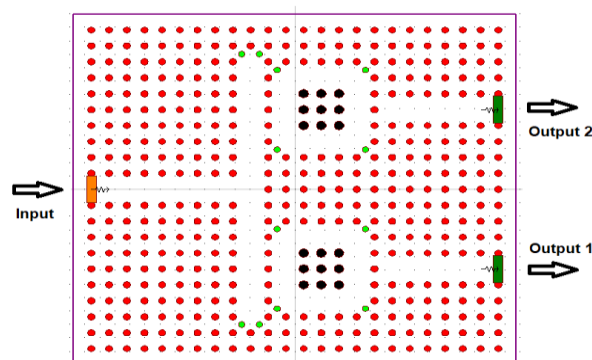
کانال	طول موج مرکزی	عرض کانال	ضریب کیفیت	ضریب انتقال توان (٪)
۱	۱۵۵۴/۵	۰/۵	۳۱۰۹	۸۹/۹
۲	۱۵۶۱/۹	۰/۴	۳۹۰۴/۷۵	۹۸/۸

در شکل (۱۰) نمودار هم‌نشوایی دو کانال نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. میزان هم‌نشوایی برای کانال ۱ نسبت به کانال ۲ در حدود ۲۷- دسی‌بل است. این میزان برای کانال ۲ نسبت به کانال ۱ در حدود ۲۳/۷- دسی‌بل خواهد بود.



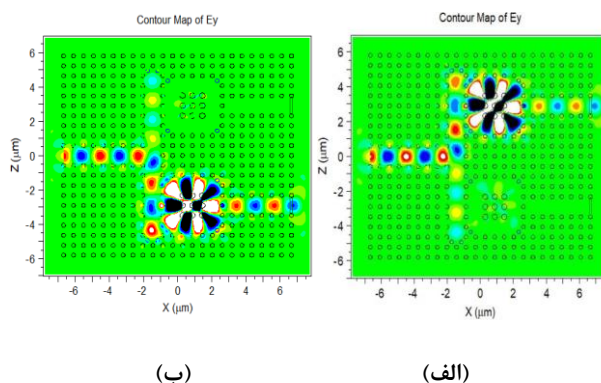
شکل (۱۰): میزان هم‌نشوایی کانال‌های ۱ و ۲

در این ساختار (که در شکل (۷) نشان داده شده است) ابتدا یک موجبر با حذف یک ردیف از میله‌های دی‌الکتریک اصلی ایجاد شده است، سپس یک طرف این موجبر دو مربع با ابعاد (۵×۵) یعنی با حذف ۵ میله افقی و ۵ میله عمودی یک حلقه مربعی به وجود آمده است. و بعد از آن، در درون این حلقه، یک تشدیدگر (۳×۳) تشکیل شده است که دو نانو تشدیدگر حلقوی به صورت قرینه در این ساختار هستند. در طرف دیگر تشدیدگر دو موجبر خروجی مشابه نیز طراحی شده که فاصله موجبرها تا حلقه‌های تشدیدکننده معادل یک ثابت شبکه لحاظ شده است.



شکل (۷): ساختار دی‌مالتی پلکسر نوری دو کاناله مربعی شکل

در شکل (۸) نحوه گزینش نور در طول موج‌های مورد نظر در دو کانال به تفکیک آورده شده است. در این دو شکل، نحوه انتشار موج الکترومغناطیسی در کانال‌های اول و دوم نمایش داده شده است. میزان تقویت تشدید به خاطر انتخاب شعاع میله‌های داخل تشدیدگر حلقوی و شعاع میله‌های پراکندگی در چهار گوشه تشدیدگر است. آنچه حائز اهمیت است تداخل نکردن طول موج‌های هر دو کانال است که کاملاً از هم تفکیک و جدا شده است.



شکل (۸): رفتار میدان الکترومغناطیسی در ساختار و گزینش طول موج در (الف) کانال ۱ و (ب) کانال ۲

مراجع

- [۱] فصیحی، کیازند، "طراحی و شبیه‌سازی حسگر گاز نوین حساسیت بالا مبتنی بر بلور فوتونی با ضریب شکست منفی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۶، شماره ۲، صص ۹-۱۵، ۱۳۹۸.
- [۲] علیائی، سعید و محب‌زاده بهابادی، احمد، "طراحی حسگر زیستی کریستال فوتونی مبتنی بر نانوتشدیدگر"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۳، شماره ۴، صص ۸۸-۸۰، ۱۳۹۵.
- [3] Talebzadeh, R. and Soroosh, M., "A high quality complete coupling 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonators," Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, vol. 9, no. 1-2, pp: 5-9, 2015.
- [4] Divya, J. and Selvendran, S. and Raja, A.S., "Two-dimensional photonic crystal ring resonator-based channel drop filter for CWDM application," Photonic Network Communications, vol. 35, no. 3, pp: 353-363, 2018.
- [5] Kannaiyan, K. and Dhamodharan, D.k. and Savarimuthu, S., "Investigation on 2D photonic crystal-based eight-channel wavelength-division demultiplexer," Photonic Network Communications, vol. 34, no. 1, pp: 100-110, 2017.
- [6] Radhouene, M. and Najjar, M. and Chhipa, M. and Robinson, S. and Suthar B., "Performance optimization of six channels WDM demultiplexer based on photonic crystal structure," Journal of Ovonic Research, Vol. 13, no. 5, pp: 291-7, 2017 Sep.
- [7] Almasian, M.R. and Abedi, K., "Performance improvement of wavelength division multiplexing based on photonic crystal ring resonator," Optik-International Journal for Light and Electron Optics, vol. 126, no. 20, pp: 2612-2615, 2015.
- [8] Alipour-Banaei, H. and Serajmohammadi, S. and Mehdizadeh, F., "Effect of scattering rods in the frequency response of photonic crystal demultiplexers," Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, vol. 17, No. 3-4, pp.259-263, 2015.
- [9] Olyaei, S. and Mohebzadeh-Bahabady, A., "Two-curve-shaped biosensor for detecting glucose concentration and salinity of seawater based on photonic crystal nano-ring resonator", Sensor Letters, Vol. 13, no. 9, 774-777, 2015.
- [10] Mohebzadeh-Bahabady, A. and Olyaei, S., "All-optical NOT and XOR logic gates using a photonic crystal nano-resonator and based on interference effect", IET Optoelectronics, Vol. 12, no. 4, 191-195, 2018.
- [11] Gupta, N.D. and Janyani, V., "Dense wavelength division demultiplexing using photonic crystal waveguides based on cavity resonance," Optik. Int. J. Light Electron Opt, vol. 125, no. 19, pp: 5833-5836, 2014.
- [12] Mansouri-Birjandi, M.A. and Tavousi, A. and Ghadrani, M., "Full-optical tunable add/drop filter based on nonlinear photonic crystal ring resonators", Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, vol. 21, pp: 44-51, 2016.
- [13] Seifouri, M. and Fallahi, V., and Olyaei, S., "Ultra-high-Q optical filter based on photonic crystal ring resonator," Photonic Network Communications, vol. 35, no. 2, pp: 225-230, 2018.
- [14] Alipour-Banaei, H. and Mehdizadeh, F. and Serajmohammadi, S., "A novel 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonators", Optik-International Journal for Light and Electron Optics, vol. 124, no. 23, pp: 5964-5967, 2013.

در جدول (۲) مقایسه‌ای بین نتایج چند مقاله دو کاناله، سه کاناله و چهار کاناله صورت گرفته و نتایج مقالات از لحاظ تعداد کاناله، ضریب کیفیت، همسنوایی و میزان ضریب انتقال توان خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. میانگین میزان همسنوایی ۲۵/۳۵- دسی‌بل و مقدار ضریب انتقال توان ۹۴٪ در طراحی ارائه شده در این مقاله به‌دست آمده است. همچنین مقدار ضریب کیفیت با توجه به بازه طول‌موج مرکزی کانال‌ها ۳۵۰۶/۹ است. عرض کانالی ۰/۴۵ نانومتر نیز مقدار بهتری نسبت به سایر ساختارها را بیان می‌کند. در انتها، ساختار طراحی شده در این مقاله فاصله بین کانالی ۷/۴ نانومتر را ارائه می‌دهد.

جدول (۲): مقایسه نتایج ساختار طراحی شده با سایر ساختارهای دو،

سه و چهار کاناله

تعداد کانال	همسنوایی (dB)	ضریب انتقال (%)	ضریب کیفیت	فاصله کانالی (nm)	عرض کانال (nm)	نوع تشدید گر	مقاله
۲	-۲۵/۳۵	۹۴	۳۵۰۶/۹	۷/۴	۰/۴۵	مربعی	ساختار پیشنهادی
۲	-۱۱	۸۰	۱۰۲۰	۱۳/۳	۷	X-شکل	مرجع [۸]
۳	-۲۹	۹۰	۶۰۸۰۳	۸	۲/۸	q-شکل	مرجع [۱۹]
۳	...	۹۵	۵۶۷	۶/۱	۲/۷۵	q-شکل	مرجع [۲۰]
۴	-۲۳/۷	۵۲/۲۵	۱۹۵۴	۳	۱/۷	X-شکل	مرجع [۱۴]

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از حلقه نانوتشدیدگر کریستال فوتونی یک فیلتر و دی‌مالتی پلکسر نوری دو کاناله طراحی و شبیه‌سازی شده است. ساختار دی‌مالتی پلکسر دو کاناله از یک موجبر ورودی T شکل، دو حلقه نانوتشدیدگر مربعی شکل و دو موجبر خروجی تشکیل شده است. با استفاده از تغییر شعاع میله‌های پراکندگی و میله‌های مرکزی نانو تشدیدگرهای حلقوی و جایگزینی مناسب میله‌های پراکندگی، دی‌مالتی پلکسر پیشنهاد شده قادر است دو طول‌موج ۱۵۵۴/۵ نانومتر و ۱۵۶۱/۹ نانومتر را گزینش نماید که در سامانه WDM قابل استفاده است. میزان ضریب انتقالی توان در کانال یک و دو به ترتیب برابر با ۸۹/۹ درصد و ۹۸/۸ درصد است. مقدار همسنوایی دو کانال نسبت به همدیگر نیز به ترتیب برابر با ۲۷- دسی‌بل و ۲۳/۷- دسی‌بل به دست آمد. همچنین میانگین عرض کانالی ۰/۴۵ نانومتر و میانگین ضریب کیفیت ۳۵۰۶/۹ به‌دست آمده است.

- [15] Alipour-Banaei, H. and Serajmohammadi, S. and Mehdizadeh, F., "Effect of scattering rods in the frequency response of photonic crystal demultiplexers," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol.17, no. 3-4, pp: 259-263, 2015.
- [16] Mehdizadeh, F. and Soroosh, M. and Alipour-Banaei, H., "An optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonators," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 127, no. 20, pp: 8706-8709, 2016.
- [17] Fallahi, V. and Seifouri, M. and Olyae, S. and Alipour-Banaei, H., "Four-channel optical demultiplexer based on hexagonal photonic crystal ring resonators," *Optical Review*, vol. 24, no. 4, pp: 605-610, 2017.
- [18] Naghizade, S. and Sattari-Esfahlan, S.M., "Tunable High Performance 16-Channel demultiplexer on 2D Photonic Crystal Ring Resonator Operating at Telecom Wavelengths," *Journal of Optical Communications*, (In Press), 2018.
- [19] Mansouri-Birjandi, M. A. and Rakhshani, M. R., "A new design of tunable four-port wavelength demultiplexer by photonic crystal ring resonators," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, no. 23, pp: 5923-5926, 2013.
- [20] Rakhshani, M. R. and Mansouri-Birjandi, M. A., "Design and simulation of wavelength demultiplexer based on heterostructure photonic crystals ring resonators," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 50, pp: 97-101, 2013.