

طراحی مفهومی فیلتر نوری ماخ-زندر مبتنی بر بلور فوتونی دوبعدی

مسعود کامران کشتیبان^۱، دانشجوی دکتری؛ کامبیز عابدی^۲، دانشیار؛ محمد جواد شریفی^۳، دانشیار

۱- گروه الکترونیک - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - m_kamran@sbu.ac.ir

۲- گروه الکترونیک - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - k_abedi@sbu.ac.ir

۳- گروه الکترونیک - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - m_j_sharifi@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک فیلتر میان‌گذر نوری مبتنی بر بلور فوتونی توسط تداخل‌سنج‌های ماخ-زندر غیرممتقارن به صورت مفهومی تحلیل و طراحی می‌شود. برای این منظور، شاخص‌های طول‌موج از قبیل طول‌موج مرکزی، پهنای باند، تیزکردن دامنه، تخت‌کردن باند عبور برای ساختار مفهومی یک طبقه انتخاب و براساس بلورهای فوتونی دوبعدی شش‌گون پیاده‌سازی شده‌است. فیلتر پیشنهادی درجه آزادی طراحی بالایی داشته و با تنظیم شاخص‌های طراحی ساختار، در طراحی فیلترهای نوری باند وسیع و باند باریک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. پهنای باند ۱ dB و ۳ dB برای ساختار اولیه به ترتیب ۱۲ nm و ۲۵ nm و برای نوع واتافتگرهای نوری به ترتیب ۴ nm و ۸ nm به دست آورده شده‌است که نشان دهنده کاهش ۳۰۰ درصدی پهنای باند و تیزشدن دامنه‌های فیلتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فیلترهای نوری، بلورهای فوتونی، تداخل‌سنج ماخ-زندر، واتافتگرهای نوری.

Conceptual Design of Mach-Zehnder Optical Filter based on Two Dimensional Photonic Crystal

Masoud Kamran kashtiban¹, PhD student; Kambiz Abedi², Associate Professor; Mohammad javad Sharifi³, Associate Professor.

1- Faculty of Electrical Engineering, University of shahid beheshti, Tehran, Iran, Email: m_kamran@sbu.ac.ir.

2- Faculty of Electrical Engineering, University of shahid beheshti, Tehran, Iran, Email: k_abedi@sbu.ac.ir.

3- Faculty of Electrical Engineering, University of shahid beheshti, Tehran, Iran, Email: m_j_sharifi@sbu.ac.ir.

Abstract: In this paper, an optical bandpass filters based on photonic crystal using asymmetric Mach-Zehnder interferometer is conceptually analyzed and designed. For this purpose, the wavelength parameters such as central wavelength, bandwidth, amplitude sharpening, and passband flattening for a single stage conceptual structure have been selected and realized based on two-dimensional hexagonal photonic crystal lattice. The proposed filter has a high degree of design freedom and by adjusting the structure design parameters, it can be used in the design of the wide and narrow bands optical filters. The 1-dB and 3-dB bandwidths for the initial structure and optical demultiplexer are obtained 12 nm, 25 nm and 4 nm, 8 nm, respectively which represents a 300 percent reduction in bandwidth and sharpening of the filter amplitude.

Keywords: Optical filters, photonic crystals, mach-zehnder interferometer, optical demultiplexer.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۳

نام نویسنده مسئول: کامبیز عابدی

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۱- مقدمه

تداخل سنج‌های ماخ-زندر^۱ یکی از پر کاربردترین عناصر قابل استفاده در مدارات نوری هستند. این تداخل سنج‌ها به سهولت در مدارهای مجتمع نوری قابل پیاده‌سازی بوده و می‌توانند در طراحی و ساخت بسیاری از اجزاء مدارها و افزاره‌های نوری از قبیل فیلترهای نوری، تافتگرهای اضافه/حذف نوری^۲، جای‌دهنده‌های نوری^۳، سوئیچ یا مدولاتورهای نوری-حرارتی^۴، سوئیچ یا مدولاتورهای نوری-الکتریکی^۵، تضعیف کننده‌های نوری تغییرپذیر^۶، میدل‌های طول موج تمام نوری^۷ و غیره نقش محوری داشته باشند. البته بسته به محیط پیاده‌سازی این تداخل سنج‌ها انواع مختلفی دارند، اما امروزه بلورهای فوتونی به دلایل توانایی‌های ذاتیشان بسیار بیشتر از قبل جهت پیاده‌سازی این تداخل سنج مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲، ۱].

همان‌طوریکه در شکل ۱ نشان داده شده‌است، تداخل سنج ماخ-زندر که به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد یک ابزار دو شاخه‌ای است که از دو تزویج‌گر/باریکه‌شکن دوطرفه تشکیل شده‌است که توسط دو موج‌بر نوری در هر شاخه به هم متصل شده‌اند. تزویج‌گر/باریکه‌شکن ورودی به عنوان مقسم توان عمل می‌کند و توان ورودی سیگنال نوری را داخل دو بازوی تداخل سنج ماخ-زندر تقسیم می‌کند و تزویج‌گر خروجی به عنوان ترکیب‌کننده^۸ توان نوری عمل می‌کند [۱]. وقتی بازوهای تداخل سنج ماخ-زندر دارای طول‌های متفاوت باشد یک تداخل سنج ماخ-زندر غیرممتقارن ایجاد می‌شود. در یک تداخل سنج ماخ-زندر غیرممتقارن به منظور کنترل خروجی لازم است که در یکی از بازوها شیفت فاز $\Delta\phi$ ایجاد شود. با توجه به اینکه فاز سیگنال به صورت $\phi = k \cdot L$ است می‌توان تغییرات فاز سیگنال‌های دو شاخه را توسط رابطه زیر بیان کرد:

$$\phi = k \cdot L \rightarrow \Delta\phi = \Delta k \cdot L + k \cdot \Delta L = \frac{-2\pi n L}{\lambda^2} \Delta\lambda + \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta n + \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L \quad (1)$$

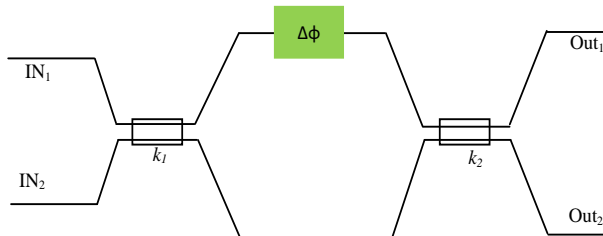
این تغییر فاز را می‌توان از روش‌های مختلفی از قبیل تغییر ضریب شکست [۳]، تغییر طول مسیر انتشار نور [۱] و همچنین با استفاده از کریستال‌های مایع [۴]، استفاده از پدیده نوری-حرارتی^۴ [۵]، و یا در نهایت استفاده از پدیده غیرخطی [۳] ایجاد کرد.

بنابراین نظریه اینکه خروجی تداخل سنج ماخ-زندر غیرممتقارن یک پاسخ متناوب و تابعی از طول موج و اختلاف طول بین شاخه‌های آن است [۷، ۶]، اختلاف فاز در شاخه‌ها و پاسخ تناوبی یک تداخل سنج ماخ-زندر غیرممتقارن در ترکیب با معماری‌های متفاوت ساختارهای دوبعدی بلورهای فوتونی گزینه مناسب برای طراحی فیلترها میان‌گذر نوری است [۸].

تاکنون طراحی افزاره‌های فیلترهای نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی اغلب بر مبنای حلقه یا کاواک و موج‌بر بوده است و این افزاره‌ها علی‌رغم داشتن مزایای ضریب کیفیت بالا [۹، ۱۰]، دو مشکل عمده دارند:

- ۱- فیلترهای حلقوی در جه آزادی طراحی پایینی (اغلب دو درجه آزادی) دارند.

۲- در زمان قرارگیری در یک مدار مجتمع نوری تحت تاثیر امیدانس طبقات بعد قرار گرفته و خروجی آنها به شدت افت می‌کند، به‌طوریکه باید در زمان مجتمع‌سازی دوباره طراحی شوند و حتی در برخی موارد امکان داشتن خروجی وجود ندارد و باعث می‌شود این فیلترها فقط به حالت گسسته و تکی مورد استفاده قرار گیرد.



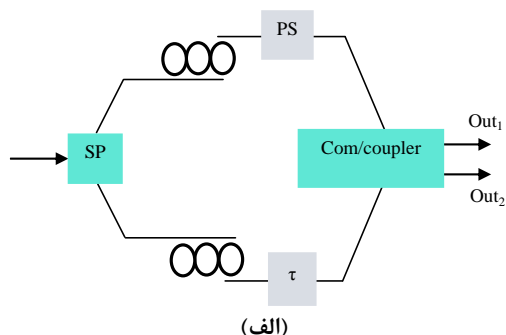
شکل ۱: بلوک دیاگرام یک ماخ-زندر یک طبقه دوشاخه‌ای

اما افزاره‌ای که در این مقاله بر مبنای تداخل سنج ماخ-زندر طراحی شده‌است، دارای درجه آزادی طراحی بالایی بوده و به علت داشتن ساختار مجتمع، اثر امیدانس طبقات بعدی بر روی آن ناچیز است. در این مقاله ساختارهای جدید ادوات فیلتری یک سیگنال نوری با استفاده از معماری‌های متفاوت تداخل سنج ماخ-زندر مبتنی بر بلورهای فوتونی دوبعدی پیشنهاد شده و روش‌های کنترل پهنای باند و تخت‌کردن پاسخ فرکانسی نور خروجی بیان می‌گردد که در طراحی جای‌دهنده‌ها و واتافتگرهای نوری نقش به‌سزایی دارد.

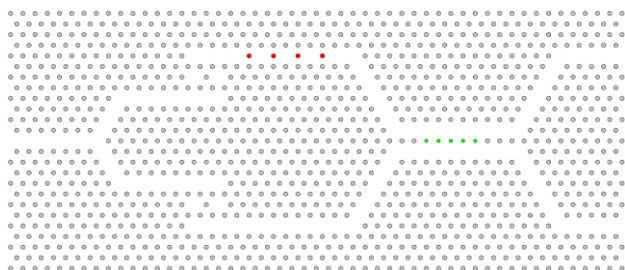
۲- طراحی مفهومی

شکل ۲ بلوک دیاگرام طراحی مفهومی معماری فیلترهای نوری یک طبقه را بر اساس ساختار ماخ-زندر دوشاخه‌ای نشان می‌دهد. توان نوری ورودی (IN_1 و IN_2) توسط یک تزویج‌گر (k^1) یا باریکه‌شکن (SP^1) به دو شاخه تقسیم می‌شود، برای مدیریت و کنترل پاسخ فازی در شاخه‌ها از سیستم تأخیر (τ^{11}) و شیفت‌دهنده فاز (PS^{12}) و رینگ‌رزوناتور موازی یا سری (RR^{13}) استفاده می‌شود. تأخیر ناشی از اختلاف طول مسیر نوری را می‌توان توسط افزایش طول موج‌بر در هر شاخه یا به‌کارگیری یک حلقه در هر بازو ایجاد کرد و همچنین شیفت فاز سیگنال نوری توسط ساختارهای مبتنی بر براگ ایجاد می‌گردد. مدیریت فاز در نزدیکی باند عبور و باند توقف به مانند جبران‌کننده عمل کرده و باعث تخت‌شدن باند عبور خواهد شد علاوه بر آن زمانی که فاز در نزدیک لبه‌های باند به‌طور سریع تغییر پیدا کند تابع تبدیل پاسخ فرکانسی به شدت تیز خواهد شد.

در نهایت سیگنال نوری در هر شاخه بعد از مدیریت و تنظیم فاز توسط یک ترکیب‌کننده (com^{14}) و یا یک تزویج‌گر نوری دوباره ترکیب شده و به خروجی منتقل می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۳: الف) بلوک دیاگرام معماری اولیه ب) طراحی بر مبنای بلورهای فوتونی دوبعدی ششگون با شیفت دهنده فاز

شکل ۳-ب ساختار یک تداخل سنج ماخ-زندر غیرمتقارن دوشاخه‌ای مبتنی بر بلور فوتونی دوبعدی را بر اساس بلوک دیاگرام شکل ۳-الف نشان می‌دهد. ساختار بلور فوتونی بر اساس شبکه ششگون با دوره تناوب شبکه $a = 0.64 \mu\text{m}$ طراحی شده است. میله‌های شبکه به شکل دایره به شعاع $R_d = 0.108 \mu\text{m}$ بوده و از جنس سیلیکن با ثابت دی‌الکتریک $11/7$ است. طول تزویج گر خروجی $10a$ و شعاع میله‌های تزویج طوری طراحی شده که پنج میله وسط دارای شعاع $0.8/R_d$ و پنج میله کناری دارای شعاع R_d هستند و برای داشتن دامنه حداکثری در خروجی ساختار میله‌های تزویج گر به صورت باریک‌شونده طراحی می‌شود.

شکل ۴ شاخه بالایی ماخ-زندر بر پایه بلور فوتونی را نشان می‌دهد. همانطوری که ملاحظه می‌شود، نور ورودی که وارد موج‌برهای W_1 هر شاخه شده است، از طریق کاواک‌های تشدید C_1 و C_2 که از طریق نقص نقطه‌ای ایجاد شده‌اند به موج‌بر W_2 کوپل می‌شود. کاواک‌های تشدید نقطه‌ای طیف لورنسی موج‌بر را به شکل طیف غیرمتقارن فانو $[12, 11]$ با طول موج تشدید $1529/5 \text{ nm}$ برای C_1 و 1531 nm برای C_2 تبدیل می‌کند. این نانو کاواک‌ها برای تیز کردن دامنه فیلتر و تنظیم پهنای باند عبوری استفاده می‌گردد [۱۳].

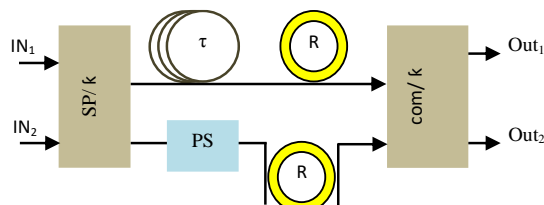
نور بعد از منتقل شدن به موج‌بر W_2 وارد شیفت‌دهنده فاز در شاخه بالایی ماخ-زندر می‌گردد که یک توری $CROW^{15}$ است [۱۴] که از اضافه کردن چهار میله به شعاع $R_b = 0.1a$ که به فاصله $2a$ (دوره تناوب شبکه) از هم قرار گرفته است، به دست می‌آید. این توری دارای یک باند 20 nm در نزدیکی طول موج $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ است.

می‌توان نشان داد که توان نور در خروجی‌های out_1 و out_2 به شکل زیر خواهد بود [۸]:

$$P_3 = P_1 \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} + P_2 \cos^2 \frac{\Delta\phi}{2} \quad (2)$$

$$P_4 = P_1 \cos^2 \frac{\Delta\phi}{2} + P_2 \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2}$$

که در این رابطه P_1 و P_2 توان نور ورودی، P_3 و P_4 توان نور خروجی و $\Delta\phi$ اختلاف فاز سیگنال‌های شاخه‌ها است.



شکل ۲: بلوک دیاگرام مفهومی یک فیلتر نوری دوشاخه‌ای

شاخص‌های طراحی یک فیلتر بر مبنای بلوک دیاگرام شکل ۲ شامل ۱- فرکانس مرکزی ۲- طول باند عبور (فرکانس قطع بالا و پایین) ۳- تخت کردن باند عبور (از بین بردن ریبیل) ۴- تیز کردن دامنه‌های فیلتر خواهد بود و پارامترهای عمده‌ای که پاسخ فیلتری را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از: نسبت تزویج، تلفات، طول موج و فاز سیگنال.

اما برای یک افزاره همانند فیلترهای نوری پاسخ سیستم با پارامترهایی هایی از قبیل پهنای باند ۳ dB و ۱ dB، ردی باند توقف و بهره باند عبور بیان می‌شود [۶] که هدف نهایی در طراحی یک فیلتر میان‌گذر نوری می‌باشد.

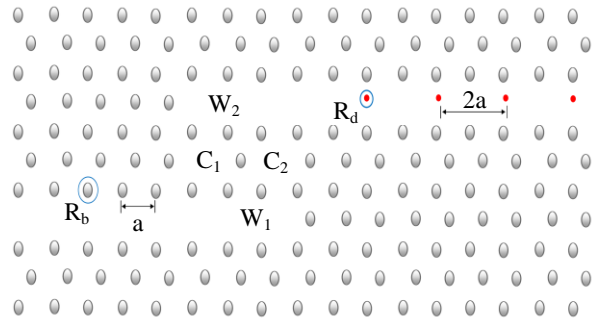
۳- طراحی بر مبنای بلورهای فوتونی

شکل (۳) بلاک دیاگرام یک تداخل سنج ماخ-زندر دوشاخه‌ای و طراحی آن بر مبنای بلورهای فوتونی دوبعدی را نشان می‌دهد.

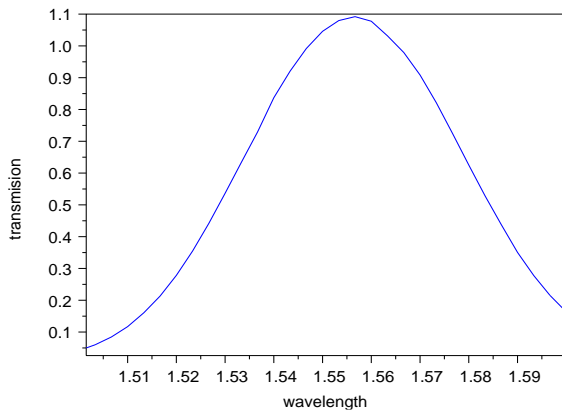
همانطوری که در شکل ۳-الف ملاحظه می‌شود، نور ورودی بعد از اعمال به پورت ورودی وارد یک باریکه‌شکن شده و توان ورودی به طور مساوی به دو شاخه تقسیم می‌شود. بر روی هر شاخه تداخل سنج ماخ-زندر ابتدا دو کاواک نوری برای تنظیم طول موج مرکزی و باند عبور و همچنین با هدف تخت کردن پاسخ فیلتر ایجاد شده است. سیگنال نوری که وارد شاخه‌های تداخل سنج ماخ-زندر شده است داخل کاواک‌ها تزویج می‌گردد و نور تزویج شده به خروجی که یک موج‌بر نوری است، هدایت می‌شود. فاز سیگنال نوری داخل موج‌برها توسط شیفت‌دهنده فاز یا بلوک‌های تاخیری تغییر پیدا کرده و خروجی شاخه‌های تداخل سنج ماخ-زندر به یک ترکیب‌کننده توان یا یک تزویج گر هدایت می‌گردد و بر حسب اختلاف فاز شاخه‌ها و ساختار تزویج گر، سیگنال خروجی ماخ-زندر شکل می‌گیرد. اگر در معماری موجود، در انتهای شاخه‌های تداخل سنج ماخ-زندر، ترکیب‌کننده استفاده شود یک خروجی و اگر تزویج گر استفاده شود دو خروجی خواهد بود.

به جای یک ردیف، پاسخ فرکانسی شدت نور خروجی به صورت شکل ۶ خواهد بود.

همان طوریکه در شکل ۶ دیده می شود با تغییر ساختار تزویج می توان پهنای باند و باند عبور فیلتر را در هر دو خروجی تغییر داد که قابل استفاده در جای دهنده ها و واتا فترهای طول موج در شبکه های مخابرات نوری است. در این ساختار پهنای باند ۳ dB نزدیک ۴ nm و پهنای باند ۱ dB نزدیک ۴ nm است که همان استاندارد باند طول موج ITU برای شبکه های CWDM است [۱۶].

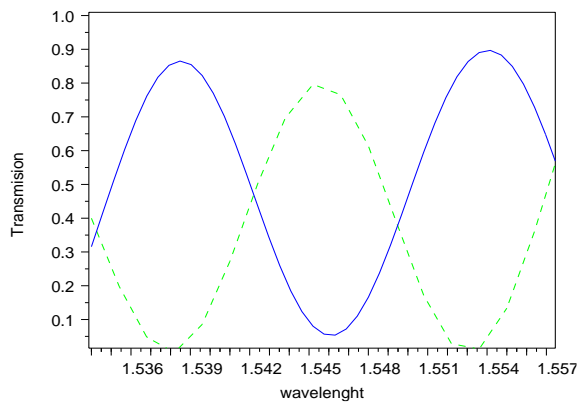


شکل ۴: شاخه بالایی بلور فوتونی - ماخ - زندر



شکل ۵: نمودار طیف انتقال خروجی شماره ۱ شکل ۳-ب

به وضوح دیده می شود علاوه بر ایجاد فیلتر میان گذر در طول موج های شبکه های CWDM می توان پهنای باند ۳ dB و ۱ dB که نشان گر ضریب کیفیت و تخت بودن فیلتر هستند را نیز کنترل یا تغییر داد.



شکل ۶: نمودار طیف انتقال توان بلور فوتونی - ماخ - زندر بر اساس تزویج گر با سه ردیف میله

۴- نتیجه گیری

فیلترهای میان گذر نوری هسته اصلی شبکه های مخابرات نوری هستند که در طراحی واتا فترها، جای دهنده ها و فیلترهای حذف/اضافه نوری نقش محوری دارند. در این مقاله یک فیلتر میان گذر ماخ - زندر به صورت مفهومی بررسی و بر مبنای بلورهای فوتونی دوبعدی ششگون

جدول ۱: محاسبه پارامترهای شبیه سازی عددی بلور فوتونی	
اندازه سلول	۳۳ nm
پله زمانی	۰/۰۴۴ fs
تعداد پله های زمانی	۲۱۷
تابع تحریک	گوسی
طول موج مرکزی λ_0	۱/۵۵ μm
متغیر	طول موج
تعداد پله های شبیه سازی	۲۰۱
شرایط مرزی جذب ^{۱۷}	لایه تطبیق شده کامل ^{۱۶} (۲۲ لایه)
ضریب شکست ماده n_{mat}	۳/۵۴
ثابت شبکه a	۶۲۰ nm
قطر میله های دی الکتریک نرمالیزه شده $2r/a$	۰/۲۲
ضخامت نرمالیزه شده h/a	۰/۴۶۷

بعد از تغییر فاز سیگنال در شاخه ها، نور شاخه بالا و پایین ماخ - زندر وارد یک تزویج گر باریک شونده شده و به خروجی های ماخ - زندر تزویج می گردد. تزویج گر چنان تنظیم شده که فقط خروجی (۱) وجود داشته باشد و خروجی (۲) صفر شود.

مشخصات کامل شبکه بلور فوتونی به همراه پارامترهای شبیه سازی عددی در جدول ۱ درج شده است.

نمودار طیف انتقال خروجی شماره ۱ ساختار شکل ۳-ب را که یک فیلتر میان گذر است در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان طوریکه در شکل ۵ ملاحظه می شود خروجی فیلتر در اطراف طول موج ۱/۵۵ میکرومتر بیشترین مقدار را دارد و باند عبور فیلتر کاملاً تخت است، ولی به خاطر بالا بودن پهنای باند ۳ dB ضریب کیفیت پایینی دارد.

در پایان اشاره می شود که تلفات ماده به خاطر انتخاب سیلیکن به عنوان دی الکتریک و اثرات پاشندگی در افزاره پیشنهادی به خاطر داشتن طول کم [۱۵] بسیار ناچیز خواهد بود.

به منظور کم کردن پهنای باند ۳ dB و بالا بردن ضریب کیفیت و همچنین تیز کردن دامنه های فیلتر لازم است مشخصات تزویج گر خروجی تغییر پیدا کند. به عنوان مثال با انتخاب دو ردیف میله تزویج

- [10]. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995.
- [11]. C. J. Jin, S. Z. Han, X. D. Meng, B. Y. Cheng, and D. Z. Zhang, Demultiplexer using directly resonant tunneling between point defects and waveguides in a photonic crystal, *J. Appl. Phys.* 91, 4771–4773, 2002.
- [12]. Q. Gong, X. Hu, *PHOTONIC CRYSTAL PRINCIPLE AND APPLICATION*, Science Press, 2010.
- [13]. T. Liu, *Photonic crystal Based Optical Devices*, the university of arizona 2005

[۱۴]. سعید سیدطاهری، علیرضا عندلیب، «طراحی و اتافتگرهای مبتنی بر بلورهای فوتونی با قابلیت تواناسازی مناسب برای سامانه‌های مخابرات نوری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، ۱۳۹۶.

[۱۵]. اشکان قنبری، علی صدر، مهران نیکو، «بیشینه سازی ضریب فشردگی و پهنای باند پالسهای نوری با استفاده از چرپ فرکانسی در فیبرهای فوتونیک کریستال»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳، شماره ۲، ۱۳۹۲.

- [16]. ITU-T Rec. G.694.2 Spectral grids for WDM applications 2003.

بر پایه سیلیکن با کمترین تلفات در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر طراحی گردید. این ساختار دارای هشت درجه آزادی در طراحی است که نسبت به فیلترهای بلور فوتونی مشابه مزیت بالاتری دارد. پهنای باند اولیه فیلتر ۲۵ nm و باند عبور یک دی بی ۱۲ nm بدست آمد که با تغییرات ساختار تزویج گر خروجی این شاخص‌ها به ترتیب به ۸ nm و ۴ nm تقلیل پیدا کردند که معنای آن کاهش ۳۰۰ درصدی پهنای باند و تیز شدن باند عبور است. که نشان دهنده تبدیل یک فیلتر میان گذر باند وسیع به فیلتر میان گذر باند باریک است که از خصوصیات ویژه این فیلتر بشمار می‌رود.

در نهایت در این مقاله نشان داده شد که ماخ-زندر با باریکه شکن Y - شکل در ورودی و کوپلر در خروجی می‌تواند به عنوان یک و اتافتگرهای طول موج در شبکه‌های مخابرات نوری عمل کند

مراجع

- Martinez, A. Griol, P. Sanchis, and J. Marti, Mach-Zehnder interferometer employing coupled-resonator optical waveguides, *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 6, pp. 405–407, Mar. 2003
- M. H. Shin, W. J. Kim, W. Kuang, J. R. Cao, H. Yukawa, S. J. Choi, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and W. K. Marshall, Two-dimensional flat band slow light in photonic crystal waveguides, *Optics Express*, vol. 16, pp. 6227–6232, 2008
- M. Soljacic, S. G. Johnson, S. Fan, M. Ibanescu, E. Ippen, and J. D. Joannopoulos, Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity, *J. Opt. Soc. Amer. B, Opt. Phys.*, vol. 19, no. 9, pp. 2052–2059, Sep. 2002
- Y. Liu and L. W. Chen, Tunable photonic-crystal waveguide Mach-Zehnder interferometer achieved by nematic liquid crystal phase modulation, *Opt. Express*, vol. 12, no. 12, pp. 2616–2624, Jun. 2004
- E. A. Camargo, H. M. H. Chong, and R. M. De La Rue, 2D photonic crystal thermo-optic switch based on AlGaAs/GaAs epitaxial structure, *Opt. Express*, vol. 12, no. 4, pp. 588–592, Feb. 2004.
- C.K.Madsen and J.H. Zhao: *OPTICAL FILTER DESIGN AND ANALYSIS, A SIGNAL PROCESSING APPROACH* (John Wiley & Sons, New York, 1999)
- P.E. Green, *Fiber Optic Networks*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- Herbert Venghaus, *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer 2006
- M. H. Shin, W. J. Kim, W. Kuang, J. R. Cao, H. Yukawa, S. J. Choi, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and W. K. Marshall, Two-dimensional photonic crystal Mach-Zehnder interferometers, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 4, pp. 460–462, Jan. 2004.

زیر نویس‌ها

- Splitter
- Delay
- Phase shifter
- Ring Resonator
- combiner
- short coupled resonator optical waveguide
- Perfect matched layer
- Absorption boundary condition

- Mach-Zehnder interferometer
- optical add/drop multiplexers
- optical interleavers
- thermo-optical
- electro-optical
- variable optical attenuators (VOAs)
- all-optical wavelength converters
- combiner
- Coupler