



طراحی و شبیه سازی فیلتر نوری براساس کریستال های فوتونیک

مهران حسین زاده^۱

۱- دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۷ اسفند ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۲

ارائه در سایت: ۱۲ خرداد ۱۴۰۲

کلید واژگان:

بلور نوری

فیلتر نوری

شکاف باند بلور نوری

نقص

چکیده

با افزایش روزافزون حجم اطلاعات ارسالی و افزایش کاربران شبکه مخابراتی، سیستم های الکترونیکی کارایی خود را از دست داده اند و با سیستم های نوری که سریعتر و ایمن تر هستند جایگزین می شوند، برای افزایش کارایی سیستم های نوری باید تمام ادوات آن را نوری طراحی کرد. یک گزینه عالی برای طراحی ادوات نوری، استفاده از بلورهای نوری است. بلورهای نوری موادی با ضریب دی الکتریک متناوب می باشند که در ساختار خود محدوده ایی به نام شکاف باند بلور نوری دارند که هیچ طول موجی از آن عبور نمی کند. با این حال، با ایجاد نقص در شبکه این بلورها می توان اجازه عبور بعضی از طول موج ها را از شکاف باند آنها داد. و همین باعث شده تا بلورهای نوری راه حل بسیار مناسبی برای ساخت ادوات نوری باشند. فیلترهای نوری عضو کلیدی سیستم های مخابرات نوری هستند که به عنوان مالتی پلکسر و دی مالتی پلکسر در این سیستم ها مورد استفاده قرار می گیرند. هدف ما در این مقاله معرفی بلورهای نوری و کاربرد آنها در طراحی فیلترهای نوری مورد استفاده در سیستم های مخابراتی است. در این مقاله، یک ساختار به هم پیوسته برای طراحی فیلتر نوری بر اساس کریستال فوتونیک پیشنهاد داده شده است. فیلتر طراحی شده در انتخاب سیگنال هایی با طول موج 1550 nm توانایی دارد و فوت پرینت کلی کمتر از $118 \mu\text{m}^2$ است. ضریب انتقال و پهنای باند به دست آمده به ترتیب برابر با 92% و 0.9 nm می باشد. پس از طراحی فیلتر، تاثیر پارامترهای مختلف بر روی رفتار فیلتر بررسی شده است. طراحی ساده و ابعاد بسیار کوچک از مهمترین ویژگی های این فیلتر است.

Design and simulation of optical filter based on photonic crystals

Mehran Hosseinzadeh¹

1- Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz

Article Information

Original Research Paper
Received 18 March 2023
Accepted 02 October 2023
Available Online 04 October 2023

Keywords:
optical crystal
optical filter
optical crystal band gap
defect

Abstract

With the ever-increasing volume of information sent and the increase of users of the telecommunication network, electrical systems have lost their efficiency and are replaced by optical systems that are faster and safer. To increase the efficiency of optical systems, all devices must be designed optically. A great option for designing optical devices is to use optical crystals. Optical crystals are materials with an alternating dielectric coefficient, which have a range in their structure called the optical crystal band gap, through which no wavelength passes. However, by creating defects in the network of these crystals, some wavelengths can be allowed to pass through their band gap. And this has made optical crystals to be a very suitable solution for making optical devices. Optical filters are the key members of optical communication systems that are used as multiplexers and demultiplexers in these systems. Our goal in this article is to introduce optical crystals and their use in the design of optical filters used in telecommunication systems. In this article, a connected structure for designing an optical filter based on photonic crystal is proposed. The designed filter has the ability to select signals with a wavelength of 1550 nm and the overall footprint is less than $118 \mu\text{m}^2$. The transmission coefficient and bandwidth obtained are equal to 92% and 0.9 nm respectively. After designing the filter, the effect of different parameters on the behavior of the filter has been investigated. Simple design and very small dimensions are the most important features of this filter.

۱- مقدمه

نوری با استفاده از فوتونیک کریستالهای دو بعدی در نرم افزار آرسافت طراحی کرده ایم و ساختار باند آن را با تغییر شعاع میله های دی الکتریک و ثابت شبکه همین طور طیف طول موج خروجی فیلتر را نسبت به تغییرات شعاع، ضریب شکست و ثابت شبکه میله های نقص بررسی می کنیم. سپس در بخش چهارم مروری بر نتایج حاصل از مقاله خواهیم داشت و پیشنهاداتی برای کار بیشتر در این زمینه ارائه می دهیم.

۲- روش تحقیق

نانو کاواک های فوتونیک کریستال

یکی از کاربردهای نوید بخش بلور نوری این است که در نانو حفره های نوری می توان نور را برای مدت طولانی در حجم بسیار کوچک (V_{mod}) به دام انداخت (این به ضریب کیفیت حفره بستگی دارد). محلی کردن نور قوی در نانو حفره های فوتونیک کریستال، می تواند به طور چشمگیری تعامل نور و ماده و اثر متقابل فوتون را افزایش دهد که برای طیف گسترده ایی از برنامه های کاربردی در این زمینه به ویژه در علوم مهندسی بسیار اهمیت دارد. علاوه بر این، با ترکیب نقص شبکه فوتونیک کریستال (به عنوان مثال در یک پیکر بندی خطی) می توان موجبری با ابعاد بسیار کوچک ساخت که انحنای تیز و تلفات بسیار پایینی دارد. این موجبرها و حفره ها می توانند در یک تراشه مجتمع شوند که این امر باعث می شود به مدارهای مجتمع نوری با پهنای باند بسیار زیاد دست پیدا کنیم. به علاوه، از آنجا که ادوات می توانند با مواد الکترونیکی استاندارد و در هندسه مسطح ساخته شوند می توان آنها را برای استفاده در سطوح بالاتر مجتمع کرد. می توان در نانو حفره ها بسته به نوع کاربردها (V_{mod}) و ضریب کیفیت Q را تعریف کرد. V_{mod} به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_{mode} = \frac{\int d^3\vec{r} \epsilon(\vec{r}) |E_{mode}(\vec{r})|^2}{\max_{\vec{r}} \{\epsilon(\vec{r}) |E_{mode}(\vec{r})|^2\}} \quad (1)$$

که در آن $\epsilon(\vec{r})$ تغییرات ضریب شکست در فضا و $E_{mode}(\vec{r})$ مشخصات میدان الکتریکی از حالت است.

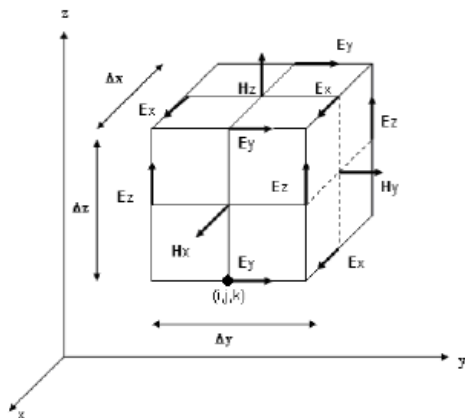
همانطور که در بالا ذکر شد، حبس عمودی در ورق با TIR^1 به دست می آید. بنابراین نقص در شکاف انرژی از تلفات تابشی مدهای تابشی پیوسته کوپل شده که در مخروط نوری وجود دارند ناشی می شود. این تلفات عمودی توسط Q_{ver} تعریف می شود. علاوه بر این، نور می تواند با توجه به تعداد محدود لایه های فوتونیک کریستال اطراف نقص، به صورت عرضی نشت کند. که این نشت عرضی با Q_{tot} توصیف می شود. سپس می توان ضریب کیفیت Q کل را با انطباق این دو عامل به صورت زیر به دست آورد:

$$\frac{1}{Q_{tot}} = \frac{1}{Q_{ver}} + \frac{1}{Q_{tot}} \quad (2)$$

تلفات عرضی را می توان با افزایش تعداد لایه های فوتونیک کریستال اطراف حفره در فرکانس کاری نوار شکاف به طور مؤثر کاهش داد. بنابراین، تلفات عمودی Q_{ver} در تعیین ضریب کیفیت کل Q_{tot} نقش اساسی خواهد داشت.

فیلترهای نوری عناصر کلیدی سیستم های WDM و DWDM در شبکه انتقال نوری می باشند. فیلترهای نوری به دلیل قابلیت حذف نویز در کانال ارتباطی برای جداسازی کانال های WDM و DWDM نامطلوب از کانال های مطلوب مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین با به کار گیری بخشی از طول موج سیستم مولتی پلکسر، یک دی مولتی پلکسر نوری را ایجاد می کنند که باعث ادغام کانال های متعدد در سیستم WDM و DWDM می شود (Ekhteraei, et.al, 2020), (Aarani et.al, 2019), (Zonouri and Hayati, 2019), (Kazemi and Hayati, 2019). با استفاده از شبکه های نوری و روش WDM می توان تا حد زیادی این مشکلات را برطرف کرد. با استفاده از این روش، می توان به پهنای باندی تا ۱۶۰۰ گیگاهرتز در ثانیه دست یافت که با این پهنای باند، می توان بیش از ۳۰ میلیون تماس تلفنی را فقط با استفاده از یک فیبر منتقل کرد و مشکل تکنولوژی های متفاوت نیز به راحتی حل می شود (Hayati et.al, 2019), (Daryabari et.al, 2019), (Vaziri et.al, 2019). با توجه به اینکه اطلاعات بر روی فیبر با استفاده از روش WDM بر روی طول موج های مختلفی ارسال می شود که مستقل از یکدیگر عمل می کنند، لذا می توان به راحتی انواع مختلف تکنولوژی را در این زمینه مورد استفاده قرار داد و خدمات مختلفی نظیر صوت، تصویر، اطلاعات و مولتی مدیا را به کاربران ارائه کرد (Hayati and Majidifar, 2014). برای رفع محدودیت پهنای باند و فراهم کردن سرویس های چندگانه روی یک شبکه، باید با استفاده از فناوری مالتی پلکس تقسیم طول موج (DWDM)، بیش از یک طول موج در یک فیبر، مالتی پلکس گردد. سیستم DWDM قابلیت انتقال ترافیک مجتمعی تا چندین ترابایت در هر ثانیه را از طریق یک فیبر دار است. به عنوان نمونه، در ۴۰ طول موج، که هر کدام از آنها نرخ ۴۰ Gbps در یک واحد فیبر را دارند، پهنای باند را به ۱.۶ Tbps می رساند. از آن جایی که گره ها محل پایان دهی به چندین فیبر با چنین مشخصاتی هستند، کل پهنای باند عبوری از آنها در محدوده چندین ترابایت است. با این حال برای رسیدن به چنین بازده ای در سیستم های DWDM، به کارکردهای نوری ویژه ای همچون: بافت های اتصال متقاطع بزرگ، لیزرها و فیلترهای قابل تنظیم، گیرنده های با حساسیت بالا و نویز کم، فشرده سازهای پالس نوری، همسان سازهای نوری، تقویت کننده های نوری باند پهن و کم نویز، حسگرهای نوری سریع با نویز کم، اتصال دهنده های هوشمند نوری و غیره نیاز است (Hayati et.al, 2015), (Hayati and Noori, 2014), (Zand et.al, 2020), (Groos, et.al, 2002). در سناریو DWDM از آن جایی که در هر فیبر تعدادی کانال وجود دارد، هر کانال می تواند نوع خاصی از ترافیک را حمل کند. مثلاً SDH/SONET در یک کانال، ATM، در کانالی دیگر و شاید TDM یا اینترنت در کانال های دیگر انتقال یابد، در حال حاضر هیچ سیستم یا شبکه دیگری قادر به ارائه چنین خدماتی نیست. هدف اصلی در این مقاله معرفی فوتونیک کریستالهای دو بعدی به عنوان راه حلی برای ساخت ساده تر و کاربردی تر ادوات نوری و همچنین طراحی و ساخت یک فیلتر نوری با استفاده از آن است. در بخش دوم به معرفی معادلات حاکم بر امواج نوری، نرم افزار آرسافت برای شبیه سازی ادوات نوری، معرفی روش بسط امواج تخت، روش بسط امواج تخت اصلاح شده، روش تفاضل نامحدود در حوزه زمان و توصیف انواع نقص ها و میکرو کاواک های بلور نوری می پردازیم. در بخش سوم یک فیلتر

¹ Total internal reflection



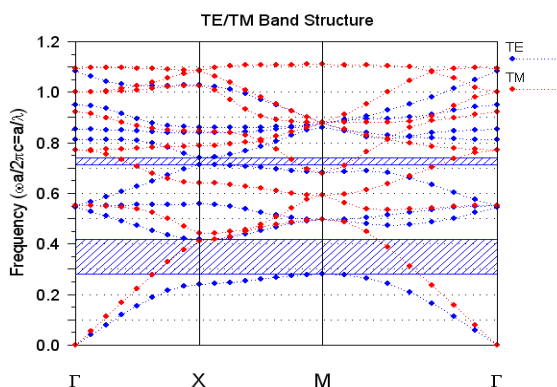
شکل ۱. نمایش میدان های E و H در سه بعد

الگوریتم پیشنهادی

در این فصل، یک فیلتر نوری بر اساس کریستال نوری دو بعدی پیشنهاد داده شده است. روش انتخاب طول موج در فیلتر ارائه شده بر اساس یک کاوک رزونانس به همراه کاهش شعاع میله‌ها است. انتقال بالا، ابعاد خیلی کوچک و طراحی ساده از ویژگی‌های این فیلتر است.

روش پیشنهادی برای طراحی فیلتر نوری

برای طراحی فیلتر با استفاده از نرم افزار آرسافت، از یک کریستال نوری دو بعدی به عنوان پایه طراحی استفاده می‌کنیم، که از میله‌های دی الکتریک با شبکه مربعی ساخته شده و در هوا فرو برده شده است. در ساختار ابتدایی، تعداد میله‌های دی الکتریک در راستای محور X و Z به ترتیب ۲۳ و ۱۸ عدد است. شاخص انکساری میله‌های دی الکتریک ۳/۴۷ و شعاع میله‌ها در یک دوره ۰/۲ است. ساختار باند این بلور فوتونیک در شکل (۲) نشان داده شده است. این ساختار دارای دو شکاف باند در حالت TE است که در سطوح تیره در ساختار باند بلور نوری نشان داده شده است. در این شکل می‌بینیم که اولین ناحیه شکاف باند در حدود $0.42 < a/\lambda < 0.28$ است. با فرض mn $a=558$ ناحیه شکاف باند در حدود $1992 < mn < 1328$ خواهد بود.



شکل ۲. ساختار باند PhC اولیه

تغییرات ناحیه شکاف باند نسبت به تغییرات شاخص انکساری و شعاع میله‌ها در یک دوره تناوب در شکل (۳) نشان داده شده است. حالت TE و

تا اینجا با انواع فوتونیک کریستال و کاربرد آن در طراحی ادوات نوری و سیستم های مخابراتی آشنا شدیم. دانستیم که کریستال های فوتونیک شکاف باندی دارند که هیچ طول موجی از آن عبور نمی‌کند اما با ایجاد نقص در ساختار بلورهای نوری می‌توان بعضی از طول موج ها را از آن عبور داد. اکنون به معرفی نرم افزار شبیه ساز آرسافت می‌پردازیم. که برای شبیه سازی بلور ها و ادوات نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

معرفی نرم افزار آرسافت

آرسافت یک مجموعه نرم افزار است که برای طراحی و شبیه سازی مخابرات نوری استفاده می‌شود. این مجموعه شامل نرم افزارهایی برای کاربردهای زیر است:

- طراحی ادوات: طراحی و تجزیه و تحلیل ادوات نوری، آرسافت تمام قطعات اکتیو و پسیو را شبیه سازی می‌کند.
 - شبیه سازی سیستم: شبیه سازی سیستم های مخابراتی نوری در مرحله انتشار سیگنال.
 - مدل سازی شبکه: آرسافت می‌تواند تمام شبکه های نوری را شبیه سازی کند.
- در این مقاله از دو نرم افزار تمام موج^۱ و لیبوت کد^۲ آرسافت استفاده می‌شود.

الگوریتم تفاضل محدود در حوزه زمان

یک ناحیه از فضا را تصور کنید که شامل هیچ بار الکتریکی و جریان خروجی نباشد. معادلات ماکسول را می‌توان در مختصات دکارتی به صورت شش معادله اسکالر ساده نوشت. دو نمونه به شرح زیر هستند:

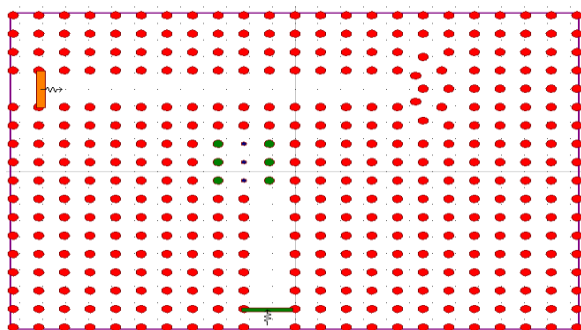
$$\frac{\partial}{\partial t} H_x = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial}{\partial z} E_y - \frac{\partial}{\partial y} E_z \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} E_y = -\frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial}{\partial z} H_x - \frac{\partial}{\partial x} H_z \right) \quad (4)$$

چهار معادله دیگر با معادلات بالا متقارن هستند و توسط چرخه تبادل x, y, z و مشتقات آنها به دست می‌آیند. معادلات ماکسول نشان می‌دهند که تغییر در میدان E وابسته به تغییر فضایی میدان H، و بالعکس است. روش FDTD معادلات ماکسول را با جداسازی معادلات زمان و مکان و پس از آن به صورت عدد در نرم افزار حل میکند. رایج ترین روش برای حل این معادلات محاسبه میدان های E و H در نقاط یک شبکه در فاصله های جدا از هم Δx ، Δy و Δz است. میدان های E و H در هر سه بعد مانند شکل ۱ قرار گرفته اند.

¹ Full wave

² Cad layout

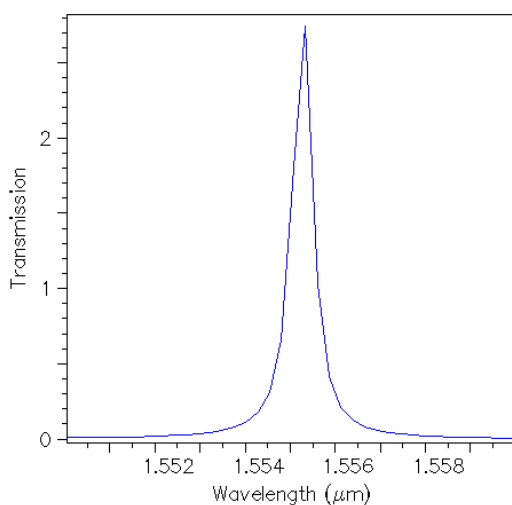


شکل ۴. طراحی نهایی فیلتر.

۳- یافته ها

شبیه سازی و نتایج

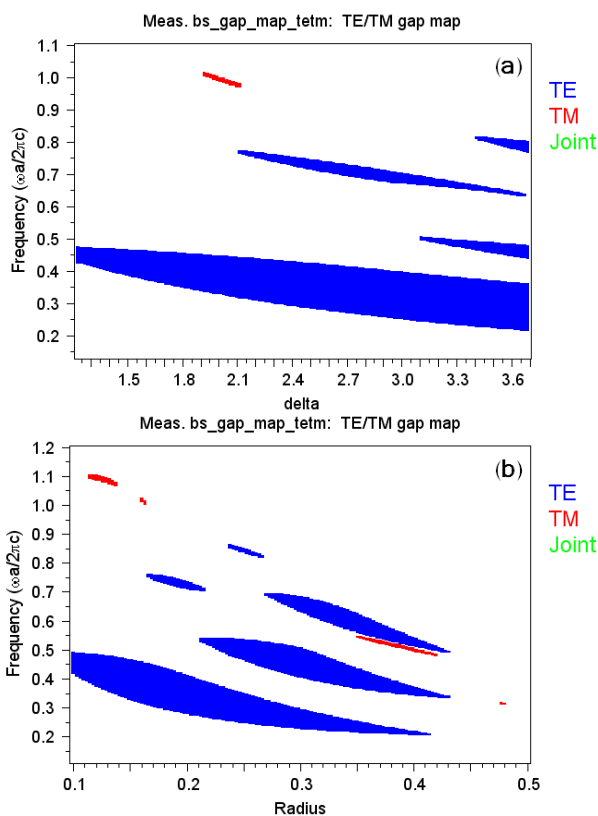
با به کار گیری ابزار شبیه سازی تمام موج^۳ نرم افزار آرسافت، فیلتر مورد نظر طراحی شده است. حالت تمام موج به بررسی انتشار نور با استفاده از دستگاه های مبتنی بر روش دامنه زمانی محدود^۴ (FDTD) می پردازد. شکل (۵) طیف خروجی فیلتر را که تنها طول موج ۱۵۵۰ nm را انتخاب می کند نشان می دهد، پهنای باند (Δλ) ۰/۹ و ضریب (λ/Δλ) ۱۷۲۲ است. ضریب انتقال این فیلتر ۹۲٪ می باشد. همچنین میزان حساس بودن طول موج خروجی فیلتر نسبت به پارامترهای ساختاری بررسی شده است.



شکل ۵. طیف خروجی فیلتر

طیف خروجی ساختار نسبت به تغییرات شعاع میله های نقص (R_d) در شکل (۶) نشان داده شده است. با افزایش R_d، طول موج خروجی به سمت طول موج های بزرگتر می رود. به عنوان مثال اگر R_d مقدارهای ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶ و ۵۷ را داشته باشد طول موج خروجی به ترتیب برابر با ۱۵۲۹، ۱۵۴۱، ۱۵۵۲ و ۱۵۵۶ نانومتر می شود. مشخصات دقیق طول موج خروجی در برابر تغییرات R_d در جدول (۱) آورده شده است.

TM ناحیه شکاف باند با استفاده از سطوح رنگی قرمز و آبی نشان داده شده است. قابل مشاهده است که ناحیه شکاف باند در حالت TM بزرگتر است و با افزایش شاخص انکساری به سمت فرکانس نرمالیزه شده پایین تری می رود و عرض ناحیه شکاف باند هم بیشتر می شود. همچنین، با افزایش شعاع نسبت به ثابت شبکه هم ناحیه شکاف باند به سمت فرکانس نرمالیزه پایین تری می رود. برای طراحی فیلتر پیشنهادی، ابتدا یک نقص خط^۱ با حذف کردن ۱۶ عدد میله دی الکتریک در راستای X ایجاد می کنیم، که به عنوان موجبر ورودی فیلتر رفتار می کند و در شکل ۴ نشان داده شده است. سپس، با کاهش شعاع ۳ میله در راستای Z که نزدیک موجبر ورودی است، کاهش نقص رزونانس^۲ را ایجاد کردیم. در آخر، ۸ میله در راستای Z حذف شده اند تا موجبر خروجی فیلتر ایجاد شود. کاهش میله های نقص با رنگ آبی نشان داده شده و شعاع آنها (R_d) برابر ۶۰ nm است. میله های دی الکتریک دیگر که در چپ و راست میله های نقص هستند با رنگ قرمز نشان داده شده اند، شعاع آنها ۱۲۰ nm است. این میله ها به سمت مرکز رزونانس نقص توسط L شیفت داده شده اند. مقدار شیفت اولیه صفر است.



شکل ۶. تغییرات ناحیه شکاف باند بر اساس (الف) شاخص انکساری و (ب) شعاع میله ها

³ Full wave

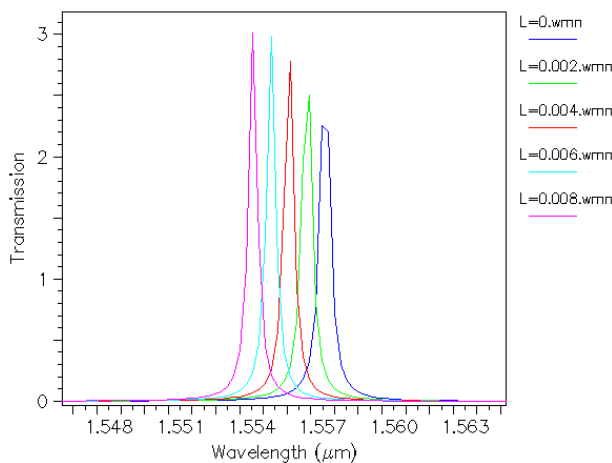
⁴ Finite difference time domain

¹ Defect line

² Reduced resonant defect

N_d	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Q	T.E (%)
۳/۴۵	۱۵۵۳	۱	۱۵۵۳	۸۶
۳/۴۶	۱۵۵۵	۰/۹	۱۷۲۸	۹۳
۳/۴۷	۱۵۵۷	۰/۹	۱۷۳۰	۹۲
۳/۴۸	۱۵۶۰	۱	۱۵۶۰	۸۲
۳/۴۹	۱۵۶۲	۱	۱۵۶۲	۸۰

شکل (۸) تغییرات طول موج خروجی را به ازای مقادیر مختلف L نشان می‌دهد. وقتی مقدار L افزایش می‌یابد، طول موج رزونانس کوتاه‌تر می‌شود و در نتیجه طول موج خروجی هم مقادیر کوچکتری را می‌گیرد. می‌توان دید که اگر λ برابر با $۱۵۴۷/۶$ ، $۱۵۴۶/۸$ ، $۱۵۴۶/۱$ ، $۱۵۴۵/۳$ و $۱۵۴۴/۶$ باشد، L برابر با ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ می‌شود. باقی پارامترهای فیلتر در جدول (۳) آورده شده است.

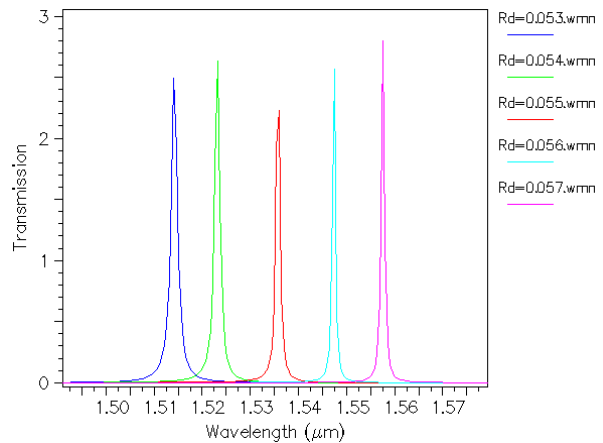


شکل ۸. طیف خروجی به ازای تغییرات L

جدول ۳. پارامترهای مهم فیلتر پیشنهادی به ازای تغییرات L

L	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Q	T.E (%)
۰	۱۵۵۷/۶	۰/۹	۱۷۳۱	۹۳
۲	۱۵۵۶/۹	۰/۹	۱۷۳۰	۹۱
۴	۱۵۵۶/۱	۰/۹	۱۷۲۹	۸۹
۶	۱۵۵۵/۳	۰/۹	۱۷۲۸	۸۶
۸	۱۵۵۴/۶	۰/۹	۱۷۲۷	۸۲

در این بخش با به کار گیری یک کاواک نقص کاهشی درون ساختار کریستال نوری دو بعدی، یک فیلتر نوری طراحی شد. شاخص فیلتر از μm^2 ۱۱۸ است. این فیلتر ضریب انتقال و کیفیت ۹۲٪ و ۱۷۲۲ را دارد. با استفاده از روش‌های عددی مثل PWE و FDTD، ما ویژگی‌های نوری ساختار پیشنهادی را به دست آوردیم و اثر تغییر پارامترها را روی طول موج خروجی فیلتر بررسی کردیم. نتایج نشان دادند که افزایش شعاع و شاخص انکساری میله‌های نقص باعث افزایش طول موج خروجی فیلتر می‌شود، با این وجود

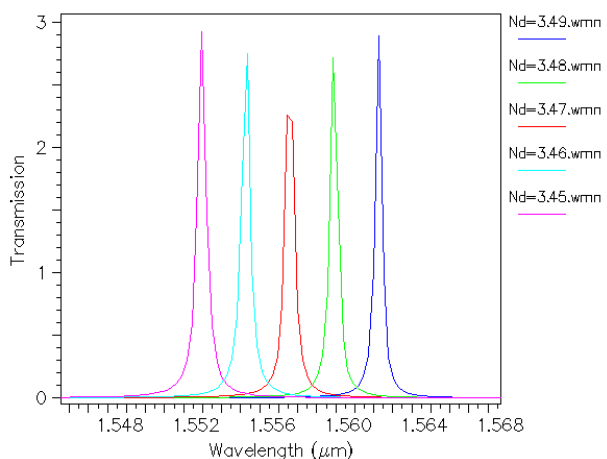


شکل ۶. طیف خروجی فیلتر براساس مقادیر R_d

جدول ۱. پارامترهای مهم فیلتر پیشنهادی به ازای تغییرات R_d

R_d	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	Q	T.E (%)
۵۳	۱۵۱۴	۰/۸	۱۸۹۲	۸۰
۵۴	۱۵۲۳	۰/۸	۱۹۰۴	۸۷
۵۵	۱۵۳۶	۰/۹	۱۷۰۷	۸۸
۵۶	۱۵۴۷	۰/۹	۱۷۱۹	۹۲
۵۷	۱۵۵۸	۰/۹	۱۷۳۱	۷۱

تغییرات طیف خروجی نسبت به شاخص انکساری میله‌های نقص (N_d) در شکل (۷) نشان داده شده است. با افزایش N_d ، طول موج رزونانس نیز افزایش می‌یابد و طول موج خروجی را به سمت مقادیر بالاتر می‌برد. به طور مثال وقتی N_d مقادیر ۳/۴۵، ۳/۴۶، ۳/۴۷، ۳/۴۸ و ۳/۴۹ را می‌گیرد، طول موج خروجی به ترتیب برابر با ۱۵۴۵، ۱۵۴۸، ۱۵۵۰، ۱۵۵۲ و ۱۵۵۵ نانومتر می‌شود. مقادیر طول موج خروجی نسبت به N_d در جدول (۲) آورده شده است.



شکل ۷. طیف خروجی فیلتر براساس تغییرات مقادیر N_d

جدول ۲. پارامترهای مهم فیلتر پیشنهادی به ازای تغییرات N_d

فیلترهای نوری در سیستم های WDM و DWDM در شبکه مخابرات نوری به کار می‌روند. یک نوع پرکاربرد از این فیلترها، فیلترهای حذف و اضافه می‌باشند. که از یک مالتی پلکسر، دی مالتی پلکسر و مسیری بین این دو تشکیل شده است. به علاقمندان توصیه می‌کنم با مطالعه بر روی این فیلتر دانش خود را در زمینه فیلترها، مالتی پلکسرها و دی مالتی پلکسرهای نوری تکمیل کنند.

مراجع

- Aarani, S. G., Hayati, M., & Kazemi, A. H. (2019). A novel UWB low-noise amplifier design using double capacitor cross-coupled feedback. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 104, 1-9.
- Daryabari, F., Zahedi, A., Rezaei, A., & Hayati, M. (2019). Gain-controlled noise-reduction LNA design using source-bulk resistors and double common-source topology. *Integration*, 68, 50-61.
- Ekhteraei, M., Hayati, M., Kazemi, A. H., & Zarghami, S. (2020). Design and analysis of a modified rectangular-shaped lowpass filter based on LC equivalent circuit. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 126, 153290.
- Gross, R., Matthews, I., & Baker, S. (2002, May). Eigen light-fields and face recognition across pose. In *Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Automatic Face Gesture Recognition* (pp. 3-9). IEEE.
- Hayati, M., Rezaei, A., & Noori, L. (2019). Design of a high-performance lowpass-bandpass diplexer using a novel microstrip structure for GSM and WiMAX applications. *IET Circuits, Devices & Systems*, 13(3), 361-367.
- Hayati, M., Abbasi, H., & Sadeghi Fathabadi, O. (2015). A novel microstrip lowpass filter with sharp roll-off and ultra-wide stopband using SICMRC. *International Journal of Electronics*, 102(9), 1475-1485.
- Hayati, M., & Majidifar, S. (2014). Narrowband bandpass filter with wide stopband using front-coupled open stubs. *International Journal of Engineering & Technology*, 2(4), 354-359.
- Hayati, M., & Noori, L. (2014). Compact tunable dual-band bandpass filter using open-loop resonator loaded by step impedances cells for multimode WLANs. *IEICE Electronics Express*, 11(5), 20120021-20120021.
- Kazemi, S. H., & Hayati, M. (2019). A compact microstrip lowpass filter with wide stopband using rectangular resonator and high impedance elements. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 11(9), 885-893.
- Vaziri, H. S., Hayati, M., & Fathipour, M. (2019). Comparison between the conventional and Hairpin piezoresistive pressure sensors, focused on the effects of process deviations on the performance and process yield. *Journal of Instrumentation*, 14(06), P06019.
- Zand, Z., Hayati, M., & Karimi, G. (2020, August). Short-Channel Effects Improvement of Carbon Nanotube Field Effect Transistors. In *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)* (pp. 1-6). IEEE.
- Zonouri, S. A., & Hayati, M. (2019). A compact ultra-wideband Wilkinson power divider based on trapezoidal and triangular-shaped resonators with harmonics suppression. *Microelectronics Journal*, 89, 23-29.

افزایش L باعث حرکت میله‌های کناری به مرکز کاواک می‌شود که در نتیجه آن طول موج خروجی به مقادیر کوچکتری میل می‌کند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله به معرفی ساختارهایی با ضریب شکست متناوب (فوتونیک کریستال ها) پرداختیم. و اینکه ویژگی اصلی این ساختارها شکاف باند فوتونی آنها است که هیچ طول موجی از آن عبور نمی‌کند. اما با ایجاد نقص هایی در شبکه می‌توان اجازه عبور برخی طول موج ها را داد و همین بلورهای نوری را به شدت در سیستم های مخابرات نوری و تولید ادوات نوری کاربردی کرده است. در واقع با استفاده از فوتونیک کریستال ها می‌توان انتشار نور را در ابعاد بسیار کوچک (در حد نانومتر) را کنترل کرد. نکته جالب دیگر این است که ناحیه شکاف باند بلور نوری به راحتی قابل کنترل است. در واقع اندازه طول موج عبوری از این ناحیه با شعاع میله ها و ضریب دی الکتریک ساختار رابطه مستقیم دارد. افزایش شعاع و ضریب دی الکتریک اندازه طول موج را افزایش می‌دهد، علاوه بر این تغییر نسبت ثابت شبکه به شعاع میله ها هم باعث تغییر اندازه طول موج عبوری می‌شود. ما با انواع بلورهای نوری و منحنی ساختار باند آنها آشنا شدیم. و دانستیم که بلورهای نوری دو بعدی به دلیل داشتن شکاف باند کامل نسبت به زاویه ورود نور حساس نیستند و همین دلیل برتری آنها نسبت به بلورهای نوری یک بعدی است. به علاوه به دلیل ساخت آسان و ارزان نسبت به بلورهای نوری سه بعدی کاربرد تجاری بیشتری داشته اند. سپس به معرفی فیلتر نوری و بررسی عملکرد آن پرداختیم، کاربرد آن را در سیستم های مخابرات نوری مانند سیستم های WDM و DWDM بیان کردیم ونتیجه گرفتیم که فیلترهای نوری یک عضو کلیدی در سیستم های مخابرات نوری محسوب می‌شوند و عمده ترین کاربرد آنها در فیلتر کردن امواج عبوری، مالتی پلکس و دی مالتی کردن آن ها است. با توجه به ویژگی های منحصر به فرد فوتونیک کریستال ها، مزایای بلور نوری دو بعدی نسبت به انواع بلورهای یک و سه بعدی و اهمیت فیلتر های نوری در شبکه ارتباطی نوری، یک فیلتر نوری را براساس فوتونیک کریستال های دو بعدی پیشنهاد دادیم. به علاوه، شکاف باند و طول موج عبوری از آن را به ازای تغییرات شعاع میله ها و ضریب دی الکتریک آنها مورد بررسی قرار دادیم. همان طور که انتظار داشتیم اندازه طول موج عبوری با افزایش/کاهش شعاع و ضریب دی الکتریک افزایش/کاهش یافت.