# طراحی طبقه تطبیقگر برای موجبر بلور فوتونی نور آهسته برمبنای تزویجگر سمتی

فاطمه مظلوم تهرانی ٬ دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمد دانایی ٬ استادیار؛ پرویز کشاورزی ٬ دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - ایران و Semnan.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - Idnaie@semnan.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - gkeshavarzi@semnan.ac.ir

چکیده: در این مقاله دو موجبر نور آهسته بلور فوتونی برمبنای یک تزویج گر سمتی طراحی شده و بهمنظور تطبیق این موجبرها به موجبر متداول ۱۷۷، ساختارهایی پیشنهاد شده است. برای شبیه سازی این ساختارها از روشهای تفاضل محدود در حوزه زمان و نیز از روش بسط موج تخت استفاده شده است. در ساختار نور آهسته اول، ضریب شکست گروه ۱۸/۰۵ و مقدار GBP برابر با ۲۷۸۰ و در ساختار دوم با تغییر شبکه بلور فوتونی مثلثی به مربعی در قسمتی از ساختار، ضریب شکست گروه ۱۸/۳۵ و مقدار GBP برابر با ۲۷۸۰ و در ساختار دوم با تغییر شبکه بلور فوتونی طبقههای تطبیق گری برمبنای انشعاب Y طراحی و پیشنهاد شده است. در محل اتصال مدار تزویج و موجبر نور آهسته از تکنیک افزایش تدریجی طبقههای تطبیق گری برمبنای انشعاب Y طراحی و پیشنهاد شده است. در محل اتصال مدار تزویج و موجبر نور آهسته از تکنیک افزایش تدریجی مفره ها استفاده شده است تا تطبیق خوبی بین موجبر نور آهسته و معمولی در بازه بسامدی موجبر بلور فوتونی حاصل گردد. به این منظور یک پالس نوری به ساختار تابیده شده و میزان توان گذری، بازتابشی و پهنای باند در هر حالت محاسبه شده است. پهنای باند حاصل شده برای ساختار اول mn موری به ساختار تابیده شده و میزان توان گذری، بازتابشی و پهنای باند در هر حالت محاسبه شده است. پهنای باند حاصل شده برای ساختار اول میزی به ساختار این یاند رست ۲ می میزان بیشینه توان عبوری شبیه سازی شده به ٪ ۹۷/۲ و در ساختار دوم به ٪ ۵/۸ نوری به ساختار دوم برابر ۳۸ ۲ می شد. در ساختار اول، میزان بیشینه توان عبوری شبیه سازی شده به ٪ ۹۷/۳ و در ساختار دوم به ٪ ۵/۸ می سد. با توجه به پهنای باند ۳۸ ۲۸ حاصل شده در ساختار اول، موجبر نور آهسته پیشنهادی، طول موج ma ۱۵۵۰ استفاده شده در مخابرات

**واژههای کلیدی:** بلورهای فوتونی، موجبر نور آهسته، تزویجگر سمتی، تفاضل محدود در حوزه زمان، بسط موج تخت، مدار تزویج.

## Design of matching stage for directional coupler-based slowlight photonic crystal waveguide

F. Mazloumtehrani<sup>1</sup>, MSc Student; M. Danaie<sup>2</sup>, Assistant Professor; P. Keshavarzi<sup>3</sup>, Associate Professor.

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran, Email: f\_mazloumtehrani@semnan.ac.ir.

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran, Email: danaie@semnan.ac.ir.

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran, Email: pkeshavarzi@semnan.ac.ir.

**Abstract:** In this paper, two slow-light photonic crystal waveguides are designed based on a directional coupler. For the coupling of the waveguides to the conventional photonic crystal W1 waveguide, matching structures are proposed. For simulating the proposed structures, finite difference time domain and plane wave expansion methods are used. For the first structure, a group-index of 18.05 and a GBP equal to 0.278 and for the second structure, by modifying a section of photonic crystal lattice structure from hexagonal to square, a group-index of 11.37 and a GBP equal to 0.255 is obtained. For matching these waveguides to the W1 waveguide, a matching stage based on a Y-splitter is designed and proposed. Gradual change technique at the intersection of slow-light waveguide and coupling stage are used in order to maximize the waveguides coupling within the photonic crystal waveguide frequency range. For this purpose, a light pulse is inserted to the structure and the transmitted and reflected powers are calculated for each case. The bandwidth obtained for the first structure is equal to 28 nm and for the second structure it is equal to 7 nm. For the first structure, the maximum simulated transmittance is equal to 97.3% and for the second structure it is equal to 98.5%. Due to the 28 nm bandwidth obtained for the first structure, the proposed slow-light waveguide is well suited for the 1550 nm wavelength which is used in optical communications.

Keywords: Photonic crystals, slow light waveguide, directional coupler, finite difference time domain, plane wave expansion, coupling circuit.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۲ و ۱۳۹۶/۰۸/۱۴ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۶ و ۱۳۹۶/۰۸/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹ نام نویسنده مسئول: محمد دانایی نشانی نویسنده مسئول: ایران – سمنان – دانشگاه سمنان – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

#### ۱- مقدمه

بلورهای فوتونی ساختارهای متناوبی هستند که میتوانند برای بازه خاصی از بسامدها گاف نوری<sup>۱</sup> داشتهباشند. وجود گاف نوری به این ساختارها این امکان را میدهد که بتوانند امواج نوری الکترومغناطیس را در ابعاد بسیار کوچک هدایت کنند. ازاینرو این ساختارها در پیادهسازی افزارههای نوری مجتمع میتوانند به کار گرفتهشوند. بلورهای فوتونی از این جهت که امکان کاهش سرعت نور را فراهم میکنند و با فنآوری مدار مجتمع سازگار هستند از اهمیت ویژهای برخوردارند. یکی از مفاهیم مهم در بحث بلورهای فوتونی، نور آهسته است که در مباحثی نظیر حافظههای نوری [۲،1]، خطوط تأخیر [۳،۴]، مدولاتورهای نوری [۵]، گیتهای نوری [۶]، مشاهده پدیدههای نوری غیرخطی و ... کاربرد دارد و امکان فشردهسازی پالس نوری را نیز فراهم میکند.

سازوکار تولید نور آهسته در بلورهای فوتونی نسبتاً پیچیده است. حفرههای تشکیلدهنده مرز موجبرکه در طرفین موجبر قرار گرفتهاند باعث میشوند که موجبر بهصورت متناوب ضخیم و باریک شود. درجایی که حفره وجود دارد ضخامت موجبر کاهش و در محلی که حفره وجود ندارد موجبر عریض تر میشود. این ساختار متناوب ضخیم و نازک تشکیل یک آیینه براگ را میدهد. اگر شرایط براگ که مژبوط به ناحیه مرزی برلوئین موجبر میشود برقرار باشد (ha=2/2 ه ثابت شبکه است)، الگوهای موج ایستاده تشکیل خواهد شد. دورتر شدن از شرط براگ موجب میشود که نور پراکنده شده از سطح آیینه ها الگوی تداخلی را تشکیل دهد که به آهستگی به سمت جلو حرکت میکند. به این مد اصطلاحاً مد آهسته می گویند [۷].

شکل ۱ سازوکارهای تولید نور آهسته بر اساس بازتابشهای همدوس از هر سلول و نیز بازتابش همهجهتی را نشان میدهد. سرعت زیاد نور این امکان را میدهد که سرعت تبادل اطلاعات بین دو نقطه زیاد شود. برای بهکارگیری نور لازم است آن را کنترل نموده و سرعت آن را برای استفاده پایین آورد، در این صورت ممکن است که کاهش سرعت گروه، پراکندگی سرعت گروه <sup>۹</sup>(GVD) زیادی را بههمراه داشتهباشد و بر روی عملکرد نور آهسته تأثیر گذاشته و پهنای باند را محدود کند. در طراحی موجبرهای نور آهسته، پهنای باند را محدود کند. در طراحی موجبرهای نور آهسته، گروه (gN) زیاد از اهمیت ویژهای برخوردار است[۸]. شکل ۱ (الف) بیانگر حالتی است که مؤلفه افقی بردار موج صفر باشد، با توجه به



شکل۱: سازوکار ایجاد نور آهسته در موجبرهای بلور فوتونی [۷]

شکل ۱(ب) مربوط به حالتی که مؤلفه عمودی بردار موج صفر باشد، در این صورت بازتابشهای متعدد از لبهها سرعت گروه را کاهش خواهد داد. بهمنظور دستیابی به بیشینه پهنای باند میتوان از رابطه (۲) منتجشده از رابطه (۱) استفاده کرد [۷].

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g} \tag{1}$$

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{c}{n_g} 0.5 \frac{2\pi}{a} = \frac{c}{2n_g a} \tag{(Y)}$$

در روابط، فوق،  $v_s$  سرعت گروه، df پهنای باند فرکانسی، k عدد موج و a ثابت شبکه هستند. ضریب شکست گروه یک موجبر را میتوان از روی منحنی پاشندگی محاسبه نمود. شیب منحنی  $d\omega/dk$  همان سرعت گروه است که ضریب شکست گروه با توجه به آن از رابطه  $m_s = c/v_s$  محاسبه میشود. بازه بسامدی که در آن  $n_s$  ثابت باقی میماند بهعنوان پهنای باند در نظر گرفته میشود. برای محاسبه پهنای باند بازهای که در آن  $n_s$ دارای حداکثر 1 + درصد تغییرات است، تعریف میشود [۱۰،۹] حاصل ضرب پهنای باند در ضریب شکست گروه (GBP) را میتوان از رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$GBP = n_g \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \tag{(Y)}$$

که طبق این رابطه *∞* بسامد زاویهای مرکزی و *∞* پهنای باند با تخمین ۱۰٪ یا تقریباً ۲۰۴۵B-۱۰ است. در این مقاله از موجبر نقص خطی استفاده شدهاست که خواص آن را میتوان از طریق کاهش عرض موجبر (۱۳،۱۲،۱۱]، تغییر پارامترهای موجبر بلور فوتونی [۱۵،۱۴] ، استفاده از موجبر بلور فوتونی شیاردار [۱۷،۱۶]، تنظیم شعاع حفرهها[۱۸]، جابهجایی ردیف اول و دوم حفرهها یا جابهجایی شبکه در طول موجبر (۱۱،۱۰۰۹] بهبود بخشید.

در این مقاله موجبری نور آهسته بر بستری دیالکتریک از جنس GaAs با آرایش مثلثی سوراخدار طراحی شدهاست. جنس سوراخها در این ساختار از هوا فرض شدهاند. این ساختارها برای مدهای TE دارای شكاف باند مى باشند. استفاده از ساختار مثلثى سوراخدار از لحاظ پیادهسازی بسیار سادهتر از ساختارهای مربعی میلهای بوده و با تكنولوژى ساخت مدارات مجتمع سازگار مىباشند. بەعبارتدىگر می توان بر روی یک بستر به صورت همزمان مدارات نوری و الکتریکی را مجتمع کرد. علاوه بر آن در ساختار مثلثی میلهای با حذف یک ردیف از دایرهها می توان موجبر ایجاد کرد. در حالی که مکانیسم ایجاد موجبر در ساختار مربعی میلهای قدری پیچیدهتر است. با توجه به مزایای گفتهشده امروزه بخش غالب ادوات پیادهسازی شده بلور فوتونی از ساختار تیغهای سوراخدار بهجای مربعی میلهای استفاده میکنند [۱۹]. ساختار مورداستفاده در این مقاله به صورت یک تزویج گر سمتی(DC) شامل دو موجبر بلور فوتونی مشابه است [٨]. تزویج گرهای سمتی ازجمله مباحث مطرح در افزارههای بلور فوتونی هستند، که بهمنظور جداسازی طولموجهای نوری مختلف به کار برده می شوند. طراحی یک مدار تطبیق

مناسب و کارآمد برای اتصال موجبر نور آهسته به موجبر معمولیW1 ، موجبری که با حذف یک ردیف از نقصها ایجاد می شود، از اهمیت زیادی برخوردار است. درغیراین صورت موجبر نور آهسته طراحی شده عملاً کاربردی نخواهد داشت [۲۰،۱۰].

در این مقاله ابتدا دو ساختار تزویج گر سمتی درنظر گرفتهشده و با جاروب پارامترها دیاگرام باند موجبری به روش بسط موج تخت در هر حالت مشاهده و بررسی شده است. با محاسبه مشتق منحنی w برحسب k در هر مورد سرعت گروه بهدست آمده است. با تقسیم سرعت نور بر سرعت گروه منحنی ضریب گروه برحسب فرکانس محاسبه می شود. بازه فرکانسی که در آن منحنی ضریب گروه دارای تغییرات حداکثر ۱۰± درصدی میباشد پیداشده و سپس حاصل ضرب ضریب گروه در پهنای باند به هنجار شده به عنوان معيار شايستگی هر ساختار محاسبه شده است. درنهایت دو ساختار انتخاب شدند. این ساختارها بهوسیله انشعاب Y شکل به موجبر W1 متصل شده و با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان رفتار حوزه زمان آنها شبیهسازی شدهاند. در این مرحله پالس نوری با طیف گوسی به ساختار تابیدهشده و مقدار توان گذری و بازتابشی محاسبه و بر توان کل تقسیم شد تا درصد عبور و بازتابش نرمالیزه حاصل گردد. با اعمال تغییر تدریجی پارامترها دو ساختار اصلاح شده برای انشعاب Y شکل پیشنهاد شد تا بتواند به صورت همزمان یهنای باند و درصد عبور را افزایش دهد. برای یکی از ساختارهای تطبیق امپدانس پیشنهادی در این مقاله میزان بیشینه عبور به بیش از ٪۹۷ رسیده است و پهنای باندی برابر با ۲۸ nm برای آن حاصل شدهاست. برای ساختار دوم بیشینه عبور شبیهسازی شده تا ٪ ۹۸/۵ افزایش پیدا کرد که این به قیمت کاهش پهنای باند به ۷ nm بود.

ساختار کلی این مقاله به این صورت است که در بخش دوم ساختارهای متداول نور آهسته، مفاهیم اولیه و روشهای پیادهسازی این موجبرها مرور و بررسی میشود؛ سپس در بخش سوم جزئیات لازم برای شبیهسازی و طراحی موجبر نور آهسته با به کارگیری نرمافزار Rsoft ارائه شدهاند. نمودارهای مختلف در این بخش برای قطبش TT ترسیم شدهاند. بخش چهارم به طراحی مدار تزویج جهت بهبود میزان انتقال نور از موجبرهای نور آهسته طراحی شده در قسمت قبل می پردازد و در بخش آخر جمع بندی کلی و نتیجه گیری بیان شدهاست.

### ۲- ساختارهای موجبری نور آهسته

متداول ترین روش برای ایجاد موجبر در بلورهای فوتونی حذف یک ردیف از حفرهها میباشد. موجبر ایجادشده در این حالت به w1 موسوم است. مطابق شکل ۲ این موجبر دارای دو مد انتشاری زوج و فرد میباشد. به طور کلی مدهای موجبری بلورهای فوتونی با توجه به نحوه توزیع میدان به دو دسته طبقهبندی میشوند: درصورتی که محوری فرضی در امتداد موجبر و در مرکز آن تصور شود، توزیع مؤلفه عمودبرسطح میدان الکتریکی نسبت به این خط، دو وضعیت را میتواند داشتهباشد. در حالت اول که مدهای زوج نامیده میشوند مؤلفه میدان الکتریکی نسبت به این

خط حالت تقارن زوج دارد. بهعبارت دیگر، مقدار میدان در وسط بیشینه بوده و با حرکت به سمت لبههای موجبر، بهصورت مساوی کاهش می یابد. در حالت دوم میدان نسبت به این خط تقارن فرد دارد. یعنی مقدار میدان در مرکز صفر است. اگر به مقدار h از این خط فرضی به بالا و پایین حرکت شود، اندازه مؤلفه عمودبرسطح میدان در پایین خط منفی مقدار میدان در بالای خط گفتهشده خواهد بود. در غالب ساختارهای بلور فوتونى با الگوى مثلثى سوراخدار معمولاً از مد زوج براى طراحى ادوات مختلف استفاده مي شود. دليل اين امر آن است كه اين مد از لحاظ ظاهری به مدهای انتشاری در داخل فیبرهای نوری شباهت خوبی دارد و بهراحتی میتوان نور را از تار نوری به مد گفتهشده جفت نمود، درحالتی که مد فرد بدین گونه نیست. بدین منظور ابتدا نور از تار نوری وارد یک موجبر دیالکتریک می شود که عرض آن به تدریج کاهش پیدا می کند و سپس موجبر دی الکتریک به ساختار بلور فوتونی متصل می شود. نحوه طراحی ساختارهای تزویج نور از موجبر تار نوری به موجبر بلور فوتونی امری شناختهشده میباشد و مقالات بسیاری به آن یر داختهاند.

نور آهسته یکی از مفاهیم مهم در کریستالهای فوتونی است که در مباحثی همچون تغییر فاز خطی، مشاهده پدیدههای نوری غیرخطی و … کاربرد دارد. کریستالهای فوتونی صفحهای جزء مناسب ترین گزینه متداولها برای تحقق نور آهسته در ساختارهای موجبری هستند. نقطه شروع این کار معمولاً موجبر IW است که در زمینه آن تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. استفاده از این موجبر، قابلیتهای بسیاری در زمینه طراحی مقسمهای توان و اتصالات موجبری باکیفیت بالا فراهم می کند. هرچند با این ساختار میتوان به سرعتهای گروه پایین دست یافت، اما مشکل عمده آن پاشندگی سرعت گروه بالا و مشکل پسزدگی توان است. پاشندگی زیاد باعث میشود که سرعت گروه به شدت به طول موج وابسته شود. این امر موجب اعوجاج و پهن شدگی پالس می شود که پدیدهای نامطلوب است.



شکل۲: دیاگرام باند مدهای موجبری در موجبر W1

برای طراحی ساختارهای موجبری نور آهسته روشهای مختلفی وجود دارد. این روشها به سه دسته عمده تقسیم میشوند. روش اول مبتنی بر مهندسی منحنی پاشندگی  $\omega$  برحسب k است. ازجمله این موارد میتوان به [۲۵–۲۲] و [۲۱–۱۸،۹] اشاره کرد. چگونگی دستیابی به نور آهسته در این ساختارها به این صورت است که موجبر WI بهعنوان موجبر پایه انتخابشده و ردیفهای مجاور آن را با بررسی اثر تغییر مکان، تغییر شکل نقایص ساختاری یا تغییر شعاع میلهها یا حفرهها و محاسبه مکرر مدهای موجبری از روش بسط موج تخت آنقدر تغییر می دهند که منحنی پاشندگی نسبتاً تختی حاصل آید. با این روشها میتوان به سرعتهای گروه پایین و GBP نسبتاً زیاد در حدود  $\pi/۰$  دست یافت. اما مشکل عمده این ساختارها در طراحی مدار تطبیق امپدانس بین این

در روش مهندسی منحنی پاشندگی معمولاً انرژی مد گذری بهجای تمرکز در راستای نقص خطی موجبری، در دو سه ردیف کناری نیز پخش می گردد. همین امر باعث می شود که تطبیق امپدانس آن به موجبر W1 که انرژی مد عمدتاً در مرکز متمرکزشده و با حرکت به سمت لبههای موجبری به صورت تقریباً گوسی شدت توان کاهش می یابد، نسبتاً دشوار باشد. بررسی مقالاتی که در زمینه تطبیق امپدانس بین موجبرهای نور آهسته و موجبر W1 کار کردهاند از قبیل [۱۰] نشان می دهد که در بهترین حالت تطبیق امپدانس بین این دو موجبر درصد عبور تقریباً ۸۰٪ است، یعنی حدود ۲۰٪ توان سیگنال به موجبر اولیه بازتابش می کند. در غالب کاربردهای مداراهای مجتمع نوری، این میزان زیاد بازتابش می تواند سبب ایجاد اختلال در عملکرد سایر قسمتها شود.

روش دوم به نام موجبرهای تزویج کاواک (CCW) موسوم است [77، (۲۷]. در این روش تعداد زیادی مشدد یکسان طراحی شده و در کنار یکدیگر قرار می گیرند تا از تزویج بین آنها یک موجبر تشکیل شود. این روش نیز مشکلات خاص خود را دارد. اولین نکته آن است که بسامد تشدید کاواکها بهراحتی قابل جابهجایی و تنظیم نیست، و علاوهبر آن پروفایل میدان در حالت تشدید باید پیرو اصول خاصی باشد تا بتوان از آنها استفاده کرد. نهایتاً و از همه مهم تر این که بسته به این که چه تعداد مشدد به هم تزویج شده باشند، منحنی عبور تغییرات زیادی می کند. در این گونه موجبرها معمولاً درصورتی که N مشدد به هم تزویج شوند، منحنی عبور نیز تقریباً دارای N قله نیز و به همان تعداد دره خواهد بود. طراحی مدارهای تطبیق در این ساختارها غالباً کار سادهای نیست.

سومین روشی که میتواند برای پیادهسازی نور آهسته بهکار گرفته شود استفاده از تزویج گرهای سمتی (DC) است [۲۹،۲۸،۲۱،۸]. ساختار تزویج گر سمتی از دو موجبر بلور فوتونی که در مجاورت هم قرار گرفتهاند تشکیل میشود. در این حالت مد موجبری اصلی به دو مد مجزای زوج و فرد تبدیل میشود. نکته دارای اهمیت در اینجا آن است که در این حالت مد زوج در یک گستره طول موجی نسبتاً قابل توجه دارای منحنی پاشندگی نسبتاً تخت است. بنابراین درصورتی که بتوان مد زوج این ساختار را تحریک نمود میتوان انتظار پهنای باند خوبی را داشت.

بهعبارتیدیگر پایه عملکرد تزویج گرهای سمتی بر اساس وجود دو مد موجبری زوج و فرد میباشد. هنگامی که در یک موجبر مدهای زوج و فرد بهصورت همزمان امکان انتشار داشتهباشند، نوع تحریک یا تغذیه موجبر در ورودی تعیینکننده این امر خواهد بود که کدام مد در موجبر منتشرمیشود. درصورتی که تغذیه موجبر در ورودی حالت زوج داشتهباشد، مد زوج تحریکشده و درصورتی که تغذیه تقارن فرد داشتهباشد، تنها مد زوج امکان انتشار پیدا میکند. حالت دیگری نیز وجود دارد. درصورتی که سیگنال تحریک نه دارای تقارن زوج و نه تقارن فرد باشد، هر دو مد تحریک می شود. علت این امر آن است که چنان سیگنال تحریکی را میتوان به صورت جمع اثر دو مد زوج و فرد نوشت [۳۰]. در این حالت بخش زوج باعث تحریک مد زوج و بخش فرد باعث تحریک مد فرد خواهد شد. در مورد موجبر نور آهسته برای دانستن این که کدام مد تحریک می شود کافی است به ورودی آن دقت شود. سیگنال ورودی از موجبر W1 پس از عبور از مقسم توان به دو بخش كاملاً مشابه تقسيمشده و به بالا و پايين موجبر نورآهسته بهصورت متقارن اعمال می شود. بنابراین با توجه به تقارن سیگنال مد زوج تحریک خواهد شد. هرچه یک مد تختتر باشد، پاشندگی کمتری خواهد داشت. با دقت در شکل ۴ به وضوح دیده می شود که تقعر مد زوج نسبت به مد فرد بسیار کمتر بوده و بنابراین پاشندگی کمتری دارد.

برای اتصال موجبر نور آهسته به موجبر W1، معمولاً موجبر W1 اولیه را توسط یک مقسم توان Y شکل به دو موجبر فوق متصل می کنند. هرچند در این روش GBP به میزان روشهای قبل زیاد نمی شود، اما می توان به درصد عبور نزدیک ۹۰٪ رسید. در زمینه بهینه سازی اتصالات موجبری غیر نور آهسته بهتنهایی و نیز در زمینه موجبرهای سمتی کارهای زیادی انجام شدهاست [۳۲-۳۲]. اما مبحث طراحی مدار تطبیق بین موجبر W1 و موجبر نور آهسته ذکرشده از سه جهت هنوز جای بررسی و تحقیق دارد. جهت نخست افزایش درصد عبور به بیش از ۹۰٪ و تا حد امکان رساندن آن به نزدیک صددرصد است. دوم بحث افزایش پهنای باند گذری [۳۳] و سوم کاهش پاشندگی سرعت گروه (GVD) [۳۴] در این ساختارها است. در این مقاله سعی شدهاست که برای ساختار فوق بهطور همزمان هم درصد عبور و هم پهنای باند بهصورت ثابت افزایش یابد. به این منظور شبکه بلور فوتونی مثلثی سوراخدار از جنس GaAs با ضخامت ۰/۶۵ است انتخاب شدهاست. شعاع حفرهها تشکیلدهنده بلور فوتونی در این مقاله برابر ۰/۳۵ اختیار شده است [۳۵]. این ساختار در بخش ۳ تشریح خواهد شد.

### ۳- طراحی موجبر نور آهسته

برای پیادهسازی ساختار تزویج گر سمتی (DC) از دو ساختار پیشنهادی مطابق شکل ۳ (الف) و ۳ (ب) با ثابت شبکه ۴۲۳nm استفاده شدهاست. ساختارها از جنس GaAs و شعاع تمامی حفرههای هوا برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شدهاست. در ساختار اول، ناحیه بین دو موجبر دارای شبکه مثلثی است. اما در ساختار دوم با جابهجایی افقی حفرههای

قسمت میانی، ساختار از حالت شبکه مثلثی بهصورت شبکه مربعی درآمده است. بهمنظور تحلیل دقیق این تزویج گرها، دیاگرام باند نوری برای دو ساختار شکل ۳ (الف) و ۳ (ب) بهترتیب در شکلهای ۴ و ۵ آورده شدهاست. بر اساس دیاگرام باند نوری نشاندادهشده، ساختارهای مذکور دارای دو مد (یکی زوج و دیگری فرد) می باشند. برای تحریک مد زوج لازم است در بازه بسامدی که مد زوج و جود دارد، نوری که نسبت به محور تقارن افقی تقارن زوج داشته باشد، به ساختار تابانده شود.







شکل ۴: دیاگرام باند نوری برای ساختار شکل ۳ (الف)



شکل ۵: دیاگرام باند نوری برای ساختار شکل ۳ (ب)

همان گونه که در شکلهای ۴ و ۵ دیده می شود، مدهای زوج در برخی نواحی بهصورت تخت در آمدهاند. در این مقاله سعی شدهاست که با تغییر پارامترهای نشاندادهشده در شکل ۳، دیاگرام باند موجبری را به گونهای اصلاح کرد که بتوان به بیشترین مقدار GBP دست یافت. بهمنظور طراحی موجبر نورآهسته کارآمد و دارای GBP بالاتر، تأثیرات ناشی از تغییر همزمان یارامترهای r1 وr2 در ساختار اول و تغییر همزمان پارامتر جابجایی s و شعاع r در ساختار دوم بهطور جداگانه موردبررسی قرار گرفته است. به این منظور ابتدا شکل ۳ (الف) انتخاب شده و مقادیر r1 و r2 در بازه نسبتاً وسیعی جاروب شدند. در هر حالت دیاگرام باند محاسبه شد. از روی دیاگرام باند حاصل شده و بر اساس رابطه (۱) سرعت گروه برای مد زوج محاسبه گردید. سپس بر طبق رابطه (۲) پهنای باند فرکانسی هر موجبر محاسبه و درنهایت با استفاده از رابطه (۳) مقدار GBP محاسبه گردید. همین عملیات نیز برای ساختار شکل ۳ (ب) تکرار شد. با این تفاوت که در این حالت یارامترهای r و s بررسی شدند. یارامتر s مقدار جابجایی یک ردیف از حفرهها را مشخص میکند. پس از تعیین تقریب بازهای که در آن GBP بیشینه می شود می توان بازه تغییرات را کوچکتر نموده و پس از تکرار شبیهسازیها، مقدار دقیق پارامترهای بهینه را تخمین زد. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی نمودار GBP برای دو ساختار مذکور بهترتیب در شکل ۶ (الف) و شکل ۶ (ب) نشان ترسيم شدهاند.





۱-۳- تخمین پارامترهای بهینه برای موجبرهای نور آهسته



شکل ۷: نمودار GBP بهازای تغییر دو پارامتر r1 وr2

همان طور که در شکل ۶ (الف) مشخص است بالاترین مقدار GBP در بازه تقریبی ۲۷۵</۲۷۵/۰٫۳۷۵/۰٫۰ ۰/۳۵×/۰/۳۵ قرار گرفته است. برای بررسی دقیقتر GBP و نیز برای تخمین بهتر مقادیر بهینه rı وrz منحنیهای مربوط به GBP دوباره با گامهای تغییرات کوچکتر شبیهسازی و در شکل ۷ ترسیم شدهاند. بر اساس شکل ۷، بالاترین میزان GBP به دست آمده برابر با ۰/۲۷۸ است که این مقدار بهازای a r<sub>1</sub>=r<sub>2</sub>=•/۳۲ حاصل شده است. شکل ۸ نمودار ضریب گروه را به تصویر کشیده است. مقدار ضریب گروه برای حالتی که r1=r2=۰/۳۲a ، برابر با ۱۸/۰۵ است. برای سادگی، در ادامه روند این مقاله، ساختار فوق که بهازای مقادیر شعاع تعیین شده دارای GBP=۰/۲۷۸ است بهعنوان ساختار A شناخته می شود. دیاگرام باند نوری برای ساختار A در شکل ۹ ترسیم شدهاست. با توجه به این شکل، مد زوج در بازه نسبتاً وسیعی شیب تقریباً ثابتی داشته که این مطلب بیانگر دستیابی به ساختار نور آهسته مناسب است. نمودار ضریب گروه رسمشده در شکل ۱۰ این مطلب را بهروشنی نشان میدهد. با توجه به این نمودار مقدار متوسط ng برابر با ۱۸/۰۵ است.



شکل۸: نمودار ضریب گروه برای ساختار اول بهازای تغییر دو پارامتر r1 وr2

پس از تخمین مقادیر بهینه برای ساختار شکل ۳ (الف) به بررسی ساختار نشانداده در شکل ۳ (ب) پرداخته خواهد شد. نمودارهای اولیه مربوط به GBP برای این ساختار قبلاً در شکل ۶ (ب) به تصویر کشیده شدهبود. با توجه به شکل ۶ (ب) مقدار بیشینه بهدست آمده برای GBP در ناحیهای در سمت راست نمودار فوق حاصل شدهاست. به منظور تخمین دقیق تر مقادیر پارامتر جابه جایی ۶ و شعاع r که بیشترین مقدار GBP را به دست میدهند، لازم است این ناحیه با دقت بیشتری موردبررسی قرار گیرد. بدین منظور نمودار GBP در بازه 5<-3مردبررسی قرار گیرد. بدین منظور نمودار GBP در بازه 5<-3موردبررسی قرار گیرد. بدین مقدار مواد GBP در بازه 5<-3معدار در ازه یا گامهای کوچک تر شبیه سازی شده و در GBP به تصویر کشیده شده است. بر اساس شکل ۱۱ بیشترین مقدار و شعاع ۱۹ (۱۰ مه مواست. بعد از این ساختار جدیدی که به ازای مقادیر مذکور حاصل شده و دارای GBP---/۲۵۵ است، به عنوان ساختار مقدار مقاده شناخته می شود. با توجه به شکل ۱۲ حداکثر مقدار فریب گروه برای ساختار B برابر با ۱۱/۳۷ به دست می آید.



شکل ۱۱: نمودار GBP بهازای تغییر دو پارامتر s وr2 در بازه ۰/۳۵<r</۲ و ۰/۱۰۶</



#### شکل۱۲: نمودار ضریب گروه بهازای تغییر دو پارامتر s وr

دیاگرام باند نوری ساختار B در شکل ۱۳ ترسیم شدهاست. با توجه به این شکل، مد مورد نظر در بازه بسامدی (۲۷۵/۲۸۲(a/λ)-۰/۰ دارای شیب نسبتاً ثابتی است که نشاندهنده دستیابی به ساختار نورآهسته مناسبی میباشد. از طرفی دیگر نمودار ضریب گروه رسم شده در شکل ۱۴ این مطلب را بهخوبی نشان میدهد.





بهعنوان جمعبندی در این بخش از میان کل ساختارهای شبیهسازی شده دو ساختار A و B با GBP بهتر تیب ۲۷۸٬ و ۲۵۵٬ بهترین پاسخها را بهدست می دهند. بنابراین ادامه روند کار که طراحی تطبیق گر بین موجبرها است، بر روی این ساختارها انجام می شود و ساختارهایی طراحی و پیشنهاد خواهد شد. افزایش مقدار S در شکل ۳ (ب) باعث افزایش شیب منحنی پاشند گی می شود. این امر باعث خواهد شد که درهنگام محاسبه سرعت گروه با افزایش S منحنی به سمت بالا انتقال پیدا کند. دلیل فیزیکی این امر را می توان به این صورت توجیه نمود که وجود حفره ها در لبه های مسیر انتقال سیگنال باعث ایجاد پدیده براگ می شود (شکل ۱ (الف)) که به کاهش سرعت نور می انجامد. دور کردن حفره ها از مسیر عبور سیگنال باعث کاهش این اثر و افزایش سرعت گروه خواهد شد.

اگرچه در مقایسه سامانههای نور آهسته، پارامتر حاصل ضرب بهره در پهنای باند نقش عمدهای ایفا می کند، اما عدم جبران سازی پاشندگی میتواند ظرفیت بافرینگ یک سیستم را کم کند. برای جبران پاشندگی سرعت گروه (GVD) یکی از بهترین روشها آن است که در ناحیهای که موجبر دارای شاخصه نور آهسته است، تغییر شعاع تدریجی در ساختار صورت بگیرد، ایده کلی این روش در [۲۸] مطرح شده است. مطابق شکل فوتونی شده و کاهش ضریب شکست، منحنی پاشندگی را به فرکانسهای بالا منتقل می کند. با فرض اینکه ناحیه تیره رنگ، مربوط بر حسب k در ابتدا و انتهای منحنی عکس یکدیگر باشند. به گونهای که بر حسب k در ابتدا و انتهای منحنی عکس یکدیگر باشند. به گونهای که در یک حالت پالس عبوری پاشندگی نرمال و در یک حالت پاشندگی غیر نرمال را تجربه کرده که این دو تا حد زیادی اثر هم را خنثی می کنند. بسته به طول ساختار موردنیاز، تغییر شعاعها معمولاً به صورت خطی صورت می گیرد.



شکل۱۵: (الف) تغییر تدریجی شعاع در موجبر نور آهسته (ب) دیاگرام موجبری در ابتدا، انتها و میانه موجبر

### ۴- طراحی ساختار تطبیقگر

برای شبیهسازی درصد عبور و بازتابش ساختار از روش تفاضل محدود در حوزه زمان یا FDTD استفاده شده است. در این روش هر سلول واحد ساختار بهصورت ۱۶×۱۶ مشبندی شدهاست. اطراف ناحیه شبیهسازی با شرط مرزی جاذب پوشیده شدهاست. استفاده از شرط مرزی جاذب PML<sup>1</sup> معمولی در ساختارهای بلور فوتونی خوب جواب نمیدهد که این امر موجب ایجاد خطا و ایجاد تفاوت با نتایج عملی خواهد شد. درصورتی که ساختار شبیه سازی شده یک موجبر نور آهسته باشد، این موضوع تشدید می شود. این مسئله در [۳۶] به تفصیل بحث شدهاست که خلاصه آن به این صورت است که برای اینکه بازتابش از لایه جاذب کاهش یابد، بایستی در داخل لایه جاذب PML ساختار بلور فوتونی برای چند دوره تناوب تکرار شود. برای پیادهسازی ساختار از بستر GaAs استفاده شدهاست. بلور فوتونی مورداستفاده داری الگوی مثلثی سوراخدار با ضخامت ۲۵۴ nm است. در نرمافزار اندازه توان منبع ورودی ۱ mW لحاظ شدهاست. بر طبق [٣٢] ساختار فوق دارای ضریب غیرخطی Kerr برابر با۳<sup>۲</sup>/W سال ۱/۵×۱/۵ بوده و با این توان تابشی در ناحیه خطی کار خواهد کرد. در [۳۲] برای رسیدن به آستانه غیرخطی W ۳۲ توان تابشی بوده است.

در این قسمت به طراحی مدارها تطبیق مناسب با هدف دستیابی به بیشترین بازدهی برای ساختارهای A و B ،ساختارهایی که بیشترین میزان GBP بهازای آنها حاصل شد، پرداخته شدهاست. شکل۱۶ دو ساختار را برای تطبیق امپدانس نشان میدهد. بر اساس مبانی خطوط انتقال و ریز موج هنگامی که موج عبوری در موجبر IW به محل انشعاب موجبری میرسد، وجود ناپیوستگی در مسیر سیگنال باعث برگشت سیگنال به ورودی خواهد شد. در مدارات ریزموج معمولاً سعی میشود هنگامی که دو المان مختلف به یکدیگر متصل میشوند، با تدریجی کردن روند تغییرات از ایجاد بازتابش در ساختار جلوگیری شود. از همین ایده در اینجا استفاده شدهاست. در ساختار شکل ۱۶ (ب) و شکل ۱۸ (ب) سعی شدهاست که با استفاده از تغییر تدریجی به گونهای عمل شود که میزان بازتابش به حداقل برسد.

hifted	•••••
la s	
⊙ <b>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</b>	••••, 0.64a
$1 = -2r^2 = 03a$	
2R=0.7a	
<b>e</b> • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
2r=0.64a	• • • 0.6a 0.64a
e e e e e e e e e e e e e e e e e e e	$\bullet \bullet $
ha h	
.11a	
(ب)	(الف)

شکل ۱۶: (الف) ساختار مدار تزویج طراحیشده برای حالت A و (ب) طراحی پارامترها برای تزویجگر سمتی با موجبرهای نور آهسته

ساختار شکل ۱۶ (الف) ساختار متعارف است که در آن از یک انشعاب ۲ شکل برای اتصال موجبر W1 به موجبر نورآهسته و تحریک مد زوج در آن استفاده شدهاست و ساختار شکل (ب) ساختار پیشنهادی این مقاله را نشان میدهد. در قسمت انشعاب، ابعاد حفرهها جهت افزایش میزان درصد نور گذری به صورت تدریجی افزایش یافتهاند. درصد عبور نور تابیده شده برای طول موج nm ۱۵۵۰ در ساختار بهبود داده شده برابر با ٪ ۹/۷۲ است. این طول موج معادل بسامد به هنجار شده (۵/۵) ۲۷۲/ میبا شد. شکل ۱۷ نمودار میزان درصد انتقال نور در ساختار متداول نشان می اشد. شکل ۱۷ نمودار میزان درصد انتقال نور در ساختار متداول نشان می دهد.



A شکل ۱۷: میزان عبور نور تابیده شده به ساختار طراحی شده



شکل ۱۸: ( الف) ساختار مدار تزویج طراحیشده برای حالت B و (ب) طراحی پارامترها برای تزویج گر سمتی با موجبرهای نور آهسته



شکل ۱۹: میزان عبور نور تابیده شده به ساختار طراحی شده B



(الف) ساختار A (ب) ساختار B

ساختار پیشنهادی A برای بازه بسامدی A ماک۲-۱۵۴۰ دارای میزان عبور نوری بیش از ۹۰٪ است. در حالی که ساختار متداول در بازه طول موجى ۱۵۳۱ – ۱۵۵۰ عبور مطلوبي دارد. به عبارت ديگر، با اعمال تغییرات تدریجی در ساختار، پهنای باند از ۱۹ nm به ۲۸ nm افزایش پیدا کرده است. شکل ۱۹ نمودار میزان انتقال درصد عبور نور در ساختار B را برحسب طول موج در مقایسه با ساختار متداول را نشان میدهد. منحنی خطچین مربوط به ساختار نشانداده شده در شکل ۱۸ (الف) و منحنی ممتد مربوط به ساختار به تصویر کشیده شده در شکل ۱۸ (ب) است. همان طور که دیده می شود، این ساختار برای بازه طول موجی ۱۵۱۱-۱۵۰۴nm دارای درصد عبور بیش از ۹۰٪ است. ساختار تطبیق امپدانس طراحی شده برای موجبر نور آهسته حالت B دارای GBP=•/۲۵۵ است و ./٬۵٪ نور تابیده شده با طولموج مرکزی ۱۵۰۷nm از داخل ساختار عبور کرده و درصد بسیار ناچیزی از نور بازتابش میکند. در این حالت دیده می شود که تغییر تدریجی شعاع حفرهها اثر قابلملاحظهای بر روی پهنای باند نداشته است. در شکل ۲۰ چگونگی عبور نور از داخل ساختارهای پیشنهادی به تصویر کشیده شدهاست. این ساختارها مؤلفه عمودبرسطح میدان الکتریکی را نشان

میدهند. شکل ۲۰ دو نمونه ساختار بهمنظور دستیابی به نور آهسته به تصویر کشیده شدهاست. ناحیه وسط کاهش سرعت نور را برعهده داشته و نواحی کناری وظیفه تطبیق امپدانس این ناحیه را به موجبر W1 برعهده دارند. میزان تأخیر حاصله وابسته به طول ناحیه میانی می،باشد. استه به میزان تأخیر موردنیاز میتوان طول ناحیه وسط را تغییر داد. با افزایش این طول تأخیر زیاد می شود، اما افزایش بیش از حد میتواند به افزایش پاشندگی در ساختار منجر شود. ایده کلی ساختار نور آهسته افزایش پاشندگی در ساختار منجر شود. ایده کلی ساختار نور آهسته عملکرد مدار تطبیق امپدانس نیازی به بزرگ انتخاب کردن ناحیه نور آهسته نیست. بنابراین طول ساختار نشانداده شده، از قبل انشعاب Y تا بعد آن، برابر ۲۵ انتخاب شدهاست. این اندازه معادل ۱۳/۲µ می،باشد. در [۲۸،۱۹،۸] مدار طول ناحیه وسط بهترتیب تا ۲۵٬۱۹۳ و ۳۵۰٫۱۳ افزایش داده شدهاست.

ازآنجاکه ایده پیادهسازی نور آهسته با استفاده از تزویج گر سمتی قبلاً بررسی شدهاست [۲۸]، در این مقاله تمرکز عمده بر روی طراحی مدار تطبیق امپدانس قرار گرفته است. بهبیان دیگر دستاورد این مقاله بهطور عمده در طراحی مدار تزویج بین این موجبر و موجبر W1 ورودی است به گونهای که به طور همزمان هم پهنای باند و هم درصد عبور بیشینه شود. با توجه به نتایج حاصل شده برای ساختار شکل ۱۶ (الف) پهنای باند ۹۰٪ از طول موج ۱۵۳۱nm تا ۱۵۵۰nm حاصل شدهاست که برابر ۱۹nm است، درحالی که برای ساختار بهبود داده شده شکل ۱۶ (الف) مابین۱۵۴۰nm تا ۱۵۶۸nm یعنی برابر ۲۸nm است. این بدان معنی است که حدود ۴۸٪ پهنای باند افزایش داده شدهاست. بیشینه اندازه عبور به./۹۷/۳ افزایش پیدا کرده است. در ساختار دوم پیشنهادی نیز درصد عبور بیشینه به./۹۸/۵/سیده است. ازاینرو این موجبرهای نور آهسته میتوانند برای کاربرد در بسیاری از افزارهها نوری بلور فوتونی عملکرد مطلوبی از خود نشان دهند. در [۸] سه راهکار مختلف اتصال موجبر W1 به موجبر نورآهسته مبتنیبر تزویج گر سمتی پیشنهاد شدهاست که در آن بیشینه درصد گذر برابر ۸۸٪ گزارش شده است. در [۱۹] از دو روش اتصال مستقیم موجبر دیالکتریک به ساختار نور آهسته و نیز اتصال موجبر w1 بهوسیله زانوی پیشنهادی به ساختار نور آهسته استفاده شدهاست. بر اساس نتایج شبیهسازی در [۱۹] برای اتصال مستقیم میزان تلفاتی درحد ۱/۳dB گزارش شدهاست که معادل درصد عبوری تقریباً برابر با ۷۴٪ میباشد. برای ساختار دوم میزان تلفات ۰/۱۱dB گزارش شدهاست که معادل با درصد عبور ٪ ۹۷/۴ می باشد. این اندازه به مقدار./۳/۳ گزارششده در این مقاله بسیار نزدیک است اما در [۱۹] پهنای باند گزارش بسیار کوچک و برابر ۴۰GHz میباشد که با توجه به طول موج تابشی ۱۵۵۰ nm این پهنای باند حاصله کسری از یک نانومتر است. درصورتی که در اینجا پهنای باند به بیش از ۲۸nm افزایش پیدا کرده است. در [۲۸] ساختاری ابتدا شبیهسازی و سپس همان ساختار ساخته شده است. در حالت شبیهسازی تلفات گزارششده برابر ۱/۱dB میباشد که برابر درصد عبور ۷۸٪ میباشد، اما در عوض waveguides," IEEE Journal of Selected Topsics in Quantum Electronics, vol. 8, no. 4, 2002.

- [3] D. Mori and T. Baba, "Dispersion-controlled optical group delay device by chirped photonic crystal waveguides," Applied Physics Letters, vol. 85, no. 7, 2004.
- [4] M. L. Povinelli, S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, "Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays," Optics Express, vol. 13, no. 18, 2005.
- [5] A. Eshaghi, M. M. Mirsalehi and A. R. Attari, "A novel architecture of ultracompact pulse position modulator in photonic crystals," Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, vol. 7, no. 2, 2009.
- [6] M. Danaie and H. Kaatuzian, "Design and simulation of an all-optical photonic crystal AND gate using nonlinear Kerr effect," Optical and Quantum Electronics, vol. 44, no.1-2, 2009.
- [7] T. F. Krauss, "Slow light in photonic crystal waveguides," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 40, no. 9, 2007.
- [8] T. Kawasaki, D. Mori and T. Baba, "Experimental observation of slow light in photonic crystal coupled waveguides," Optics Express, vol. 15, no. 16, 2007.
- [9] J. Li, T.P. White, L. O'Faolain, A. Gomez-Iglesias and T. F. Krauss, "Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides," Optics Express, vol. 16, no. 9, 2008.
- [10] M. K. Moghaddam, A. R. Attari and M. M. Mirsalehi, "High coupling efficiency to a low dispersion slow lightsupporting photonic crystal waveguide," Journal of the European Optical Society-Rapid publications vol. 8, no. 1, 2013.
- [11] R. Hao, E. Cassan, H. Kurt, X. Le Roux, D. Marris-Morini, L. Vivien, H. Wu, Z. Zhou and X. Zhang, "Novel slow light waveguide with controllable delay-bandwidth product and utra-low dispersion," Optics Express, vol. 18, no. 6, 2010.
- [12] E. Kuramochi, M. Notomi, S. Hughes, A. Shinya, T. Watanabe and L. Ramunno, "Disorder-induced scattering loss of line-defect waveguides in photonic crystal slabs," Physical Review B, vol. 72, no. 16, 2005.
- [13] M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi and I. Yokohama, "Extremely large groupvelocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs," Physical Review Letters, vol. 87, no. 25, 2001.
- [14] A. Y. Petrov and M. Eich, "Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides," Applied physics letters, vol. 85, no. 21, 2004.
- [15] J. Adachi, N. Ishikura, H. Sasaki and T. Baba, "Wide range tuning of slow light pulse in SOI photonic crystal coupled waveguide via folded chirping," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, no. 1, 2010.
- [16] A. Di Falco, L. O'Faolain, and T. F. Krauss. "Dispersion control and slow light in slotted photonic crystal waveguides." Applied Physics Letters vol. 92, no. 8, 2008.
- [17] B. Wang, M. A. Dündar, R. Nötzel, F. Karouta, S. He and R. W. Van Der Heijden, "Photonic crystal slot nano beam slow light waveguides for refractive index sensing," Applied Physics Letters, vol. 97, no. 15, 2010.
- [18] L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen and P. I. Borel, "Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties," Optics Express, vol. 14, no. 20, 2006.

پهنای باندی برابر با۲۲۲۲ معادل با ۱۱/۲n۳ گزارش شدهاست. در ساختار اتصالی پیشنهادی در این مقاله پهنای باند بیش از به دو برابر مقدار گزارششده در [۲۸] رسیده است؛ درحالی که درصد عبور هم بهمراتب نسبت به [۲۸] افزایش پیدا کرده است. نتایج گزارششده در این قسمت از مقاله در جدول ۴ آورده شدهاست. معیار شایستگی بهصورت حاصل ضرب پهنای باند در ضریب شکست گروه در بیشینه عبور تعریف شدهاست.

جدول ۱: مقایسه پارامترهای طراحی با مراجع

مرجع	پهنای باند (nm)	ضریب شکست گروه	بیشینه عبور	معیار شایستگی
[٨]	۱.	۵۰	٨٨	44.
[19]	۰/۳۲	40.	۹۷،۴	14.
[۲۸]	11	47	Y٨	۳۶۰
ساختار B	٧	۱۱/۳۷	۹۸/۵	۲۹
ساختار A	۲۸	۱۸/۰۵	٩٧/٣	491

بهعنوان آخرین نکته لازم است به تلفات ناشی از جذب در ساختارهای پیشنهادی اشاره شود. بحث تلفات در موجبرهای کریستال فوتونی در مقالات بسیاری مطرح شدهاست. معمولاً در ادوات با ابعاد میکرومتری تلفات بلورهای فوتونی تقریباً قابل صرفنظر است. در بستر GaAs که در این مقاله استفاده شدهاست مقدار تلفات در حدود GaAs که در این مقاله استفاده شدهاست مقدار تلفات در ماه GaAs این مقاله استقاده شدهاست مقدار تلفات در ماه رایز طلام ۱۹ است. حتی در صورتی که طول ساختار بخش نور آهسته تا بر ۳۳۰ سم افزایش یابد، باز هم تلفات یک سوم مقدار فوق خواهد بود.

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله دو ساختار موجبری نور آهسته برمبنای تزویج گر سمتی پیشنهاد شدهاست. ساختارهای پیشنهادی بهترتیب دارای GBP معادل ۸۲۷۸ و ۲۵۵/۰ میباشند. برای دو ساختار مذکور، طبقه تطبیق گر امپدانس به موجبر متداول W1 با درصد عبور زیاد و پهنای باند قابل قبول طراحی شدهاست. نتایج شبیهسازی عددی این ساختارها نشان میدهد که برای این ساختارها پهنای باندی معادل با ۸۳ ۲ و ۳۳ میدهد که برای این ساختارها پهنای باندی معادل با ۳۸ ۲ و قابل حصول است. بیشینه میزان توان عبوری نیز در این ساختارها بهترتیب برابر ٪۳/۲۷ و ٪۸/۸ میباشد. ازآنجا که موجبرهای نور آهسته دارای باند نوری تخت دارای کاربردهای فراوانی است، بنابراین ساختارهای پیشنهادشده میتوانند در بسیاری از افزارههای نوری به کار گرفته شوند.

### مراجع

- A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee and A. Sherer, "Coupledresonator optical waveguide: a proposal and analysis," Optics Letters, vol. 24, no. 11, 1999.
- [2] T. J. Karle, D. H. Brown, R. Wilson, M. Steer and T. F. Krauss, "Planar photonic crystal coupled cavity

light in photonic crystals: a comparison," Journal of Optics, vol. 12, no. 10, 2010.

- [30] M. Danaie and H. Kaatuzian, "Improvement of power coupling in a nonlinear photonic crystal directional coupler switch," Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, vol. 9, no. 1, 2011.
- [31] M. Danaie, A. R. Attari, M. M. MirSalehi and S. Naseh, "Design of a high efficiency wide-band 60° bend for TE polarization," Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, vol. 6, no. 3, 2008.
- [32] M. Danaie and H. Kaatuzian, "Bandwidth Improvement for a Photonic Crystal Optical Y-splitter," Journal of the Optical Society of Korea, vol. 15, no. 3, 2011.

[33] سعید سیدطاهری، علیرضا عندلیب، «طراحی واتافتگرهای مبتنی بر بلورهای فوتونی با قابلیت تواناسازی مناسب برای سامانههای مخابرات نوری»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره۲، ۱۳۹۶.

[34] 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، شماره۲، ۱۳۹۲.

- [35] Hu. Zhen and Y. Y. Lu, "Improved bends for twodimensional photonic crystal waveguides," Optics Communications, vol. 284, no. 12, 2011.
- [36] A. Oskooi, L. Zhang, Y. Avniel and S. G. Johnson, "The failure of perfectly matched layers, and towards their redemption by adiabatic absorbers," Optics Express, vol. 16, no. 15, 2008.
- [37] S. Yoshimasa, Y. Tanaka, N. Ikeda, Y. Nakamura, K. Asakawa and K. Inoue, "Low propagation loss of 0.76 dB/mm in GaAs-based single-line-defect two-dimensional photonic crystal slab waveguides up to 1 cm in length," Optics Express, vol. 12, no. 6, 2004.
- [38] M. Danaie, A. R. Attari, M. M. Mirsalehi and S. Naseh, "Neuro-Fuzzy optimization of photonic crystal structures," In EUROCON: The International Conference on Computer as a Tool, pp. 1223-1226, Warsaw, Poland, 9-12 Sep., 2007.

4

<sup>8</sup> Omnidirectional

- <sup>9</sup> Group velocity dispersion(GVD)
- <sup>1</sup> Group index-band width product <sup>0</sup>
- <sup>1</sup> Line defect waveguide
- <sup>1</sup> Slotted photonic crystal waveguide <sup>2</sup>
- <sup>1</sup> Directional coupler(DC) <sup>3</sup>
- <sup>1</sup> perfectly matched layer

- [19] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn and R. D. Meade, *Photonic crystals molding the flow of light*, Princeton University press, 2011.
- [20] H. S. Dutta, A. K. Goyal, V. Srivastava and S. Pal, "Coupling light in photonic crystal waveguides: A review," Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, vol. 20, no. 1, 2016.
- [21] Y. Zhao, Y.N. Zhang, Q. Wang and Hu Haifeng, "Review on the optimization methods of slow light in photonic crystal waveguide," IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. 14, no. 3, 2015.
- [22] Y. Zhai, H. Tian and Y. Ji, "Slow light property improvement and optical buffer capability in ring-shapehole photonic crystal waveguide," Journal of Lightwave Technology, vol. 29, no. 20, 2011.
- [23] T. Baba, D. Mori, K. Inoshita and Y. Kuroki, "Light localizations in photonic crystal line defect waveguides," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 10, no. 3, 2004.
- [24] V. Varmazyari, H. Habibiyan, and H. Ghafoorifard. "Slow light in ellipse-hole photonic crystal line-defect waveguide with high normalized delay bandwidth product." JOSA B vol. 31, no. 4, 2014.
- [25] F. Bagci and B. Akaoglu, "Enhancement of buffer capability in slow light photonic crystal waveguides with extended lattice constants," Optical and Quantum Electronic, vol. 47, no. 3, 2015.
- [26] M. S. Moreolo, V. Morra and G. Cincotti, "Design of photonic crystal delay lines based on enhanced coupledcavity waveguides," Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, vol. 10, no. 6, 2008.
- [27] K. T. Zhu, T. S. Deng, Y. Sun, Q. F. Zhang and J. L. Wu, "Design of wideband and low group velocity based on coupled cavity waveguides," Optics Communications, vol. 285, no. 10, 2012.
- [28] T. Baba, T. Kawasaki, H. Sasaki, J. Adachi and D. Mori, "Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide," Optics Express, vol. 16, no. 12, 2008.
- [29] S. A. Schulz, L. O'Faolain, D. M. Beggs, T. P. White, A. Melloni and T. F. Krauss, "Dispersion engineered slow

زيرنويسها

- <sup>1</sup> Optical band gap
- <sup>2</sup> Slow light
- <sup>3</sup> Optical buffers
- <sup>4</sup> Delay lines
- <sup>5</sup> Bragg
- <sup>6</sup> Brillouin
- <sup>7</sup> Lattice constant