

Design and Simulation of an Integrated Optical Resonator and its Application in Integrated Microwave Photonic Oscillators

Fatemeh Javadi, S. Esmail. Hosseini*

Department of Communications and Electronics, School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
E-mails: javadihesamabadi9732006@shirazu.ac.ir, se.hosseini@shirazu.ac.ir

*corresponding author

Short Abstract

Microwave photonic oscillator based on optical resonator is one of the leading technologies in the field of microwave signal generation with low phase noise. There are several advantages of using an integrated optical resonator as an energy storage optical element in a microwave photonic oscillator instead of a long optical fiber, such as it significantly reduces dimensions of the oscillator, reduces sensitivity to environmental conditions, etc.. In this paper, two integrated Bragg grating optical resonators are designed and simulated and their applications in an integrated microwave photonic oscillator is investigated. Two types of integrated optical resonators are designed and simulated; I) phase shifted Bragg grating, and II) Moiré Bragg grating. Both resonators have resonance at 1549 nm. The simulated resonators are used in a microwave photonic oscillator and oscillate at a frequency of 20 GHz. Phase noise of the oscillators is calculated based on the Leeson model. By using these integrated optical resonators a phase noise of about -93 dBc/Hz at 10 kHz offset frequency from 20 GHz oscillation is achieved.

Keywords

Integrated optical resonator, microwave photonic oscillator, phase noise.

Short Introduction

Today, the integrated microwave photonic (IMWP), which combines integrated photonic circuit (PIC) and microwave photonic technologies, has emerged as a popular field because of its potential to increase system performance and robustness, and can also reduce size, weight, and cost and energy consumption of complex systems that integrate optical and microwave components. It has already been shown that it is possible to realize microwave signal with low phase noise by using microwave photonic technology. In this paper two integrated optical resonators for using in an integrated microwave photonic oscillator are designed and simulated.

Proposed Work and Methodology

In this paper, two types of resonators based on Bragg grating are simulated. Both resonators are used in microwave photonic oscillator and their phase noises are calculated using the Leeson model.

Conclusion

Both resonators are resonated at 1549 nm. The two microwave photonic oscillators based on these two resonators oscillate at a frequency of 20 GHz. By using these integrated optical resonators a phase noise of about -73 dBc/Hz at 1 kHz offset frequency from 20 GHz oscillation is achieved. It is shown that by using phase shifted Bragg grating results in a lower phase noise.

References

- [1] N. A. F. Jaeger and L. Chrostowski, "Fully tailorable integrated-optic resonators based on chirped waveguide Moiré gratings," *Optica*, vol. 7, no. 6, pp. 647-657, 2020
- [2] S. Esmail Hosseini, Ali Banai and Franz X. Kärtner, "Low-drift optoelectronic oscillator based on a phase modulator in a sagnac loop," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 7, pp. 2617-2624, 2017.
- [3] MandanaJahanbozorgi, S.Esmail Hosseini, SajadJahanbakht and KambizJamshidi, "Dispersion effects on the performance of whispering gallery mode based optoelectronic oscillators," *Optics & Laser Technology*, vol. 135, 2021.

طراحی و شبیه‌سازی یک مشدد نوری مجتمع و کاربرد آن در نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک مجتمع

فاطمه جوادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

سید اسماعیل حسینی

دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

نوسان‌سازهای مایکروویوفوتونیک بر پایه مشدد نوری مجتمع از فناوری‌های پیش‌تاز در حوزه تولید سیگنال مایکروویو با نویز فاز کم به شمار می‌روند. یکی از مزایای استفاده از مشدد نوری مجتمع به‌عنوان المان نوری ذخیره‌ساز انرژی در نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک به‌جای یک فیبر نوری طویل این است که ابعاد این نوسان‌ساز را به شکل قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و همین کاهش طول، حساسیت به شرایط محیطی را کاهش می‌دهد و باعث صرفه‌جویی در انرژی و هزینه می‌شود. در این مقاله دو مشدد نوری مجتمع مبتنی بر موجبر براگ گریتنینگ طراحی و شبیه‌سازی شده است و کاربرد آن در نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک مجتمع بررسی شده است. در این مقاله دو نوع مشدد نوری مجتمع شبیه‌سازی شده است: (۱) مشدد تغییردهنده فاز براگ گریتنینگ و (۲) مشدد Moiré براگ گریتنینگ. هر دو مشدد در طول موج ۱۵۴۹nm دچار تشدید می‌شوند. مشددهای شبیه‌سازی شده در نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک به کار برده شده‌اند و نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک در فرکانس ۲۰ GHz دارای نوسان هستند. نویز فاز مربوط به نوسان‌سازها بر اساس مدل لیسون محاسبه شده است که در انحراف فرکانس ۱۰ kHz از فرکانس نوسان ۲۰ GHz دارای نویز فاز ۹۳dBc/Hz- هستند.

کلمات کلیدی

مشدد نوری مجتمع، نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک، نویز فاز.

نام نویسنده مسئول: دکتر سید اسماعیل حسینی

ایمیل نویسنده مسئول: se.hosseini@shirazu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

۱- مقدمه

تولید سیگنال‌های مایکروویو با طیف خالص و پایدار برای بسیاری از کاربردها مهم است. از نوسان‌سازها برای تولید سیگنال مایکروویو استفاده می‌شود. نوسان‌سازها کاربردهای بسیاری در رادارها، ماهواره‌ها، نجوم رادیویی، مخابرات داده و شبکه‌ها، اندازه‌گیری زمان و فرکانس، پردازش سیگنال و سنجش و... دارند [۱]. روش‌های مختلفی برای تولید سیگنال‌های مایکروویو با نوسان‌ساز وجود دارد که نوع مشددی که در آن به‌کاررفته، تفاوت میان آن‌ها را تعیین می‌کند. در ادامه چند نمونه از این فناوری‌ها در زمینه تولید سیگنال مایکروویو با نویز فاز مناسب معرفی می‌شود.

با استفاده از ضرب فرکانسی می‌توان سیگنال مایکروویو در فرکانس‌های بالا تولید کرد. دو نوسان‌ساز معمول مورد استفاده به‌عنوان نوسان‌ساز مرجع در این روش، نوسان‌سازهای (SAW) و نوسان‌سازهای با مشدد کریستال کوارتز است. فرکانسی که نوسان‌ساز با استفاده از مشدد کریستال کوارتز در آن نوسان می‌کند نسبت به نوسان‌ساز SAW کمتر است. محدوده فرکانس کاری نوسان‌ساز SAW در ۶۰۰-۳۰۰ مگاهرتز است در صورتی که محدوده فرکانس کاری نوسان‌ساز با مشدد کوارتز کم‌تر از چند صد مگاهرتز است. عیب بزرگی که تولید سیگنال مایکروویو با ضرب فرکانسی دارد این است که در آن نویز فاز با ضریب $20\text{Log}N$ افزایش می‌یابد؛ که در این رابطه N مرتبه ضرب فرکانسی است [۱]. استفاده از نوسان‌ساز با مشدد دی‌الکتریک یکی دیگر از روش‌های رایج برای تولید سیگنال مایکروویو است. در این روش معمولاً از مشددهای یاقوت با مد WGM استفاده می‌شود. از معایب این روش می‌توان به حساسیت

این مشددها به عوامل محیطی مانند دما و همچنین اندازه بزرگ و توان مصرفی بالا این مشددها اشاره کرد [۲].

در سال‌های اخیر استفاده از فناوری نوین مایکروویوفوتونیک برای تولید سیگنال مایکروویو رایج شده است که به نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک مشهور شده است. در نوسان‌ساز مایکروویوفوتونیک با استفاده از فناوری فوتونیک می‌توان سیگنال مایکروویو تولید کرد. تاکنون روش‌های مختلفی برای تحقق آن پیشنهاد شده است. ساده‌ترین روشی که برای تولید سیگنال مایکروویو با استفاده از مایکروویوفوتونیک وجود دارد تاباندن نور دو لیزر به یک آشکارساز نوری است [۳]. یک سیگنال مایکروویو در خروجی آشکارساز نوری ایجاد می‌شود؛ ولی سیگنال تولیدشده توسط این روش به دلیل عدم هم‌بستگی نور دو لیزر تابیده‌شده بر آشکارساز نوری دارای نویز فاز بالایی است.

یکی از روش‌های تحقق نوسان‌سازهای مایکروویوفوتونیک با نویز فاز کم، استفاده از خط تأخیر نوری مانند فیبر نوری به‌جای قطعه ذخیره‌ساز انرژی در حلقه نوسان‌ساز است که به نوسان‌ساز الکترونوری OEO^3 موسوم است [۴]. داشتن ضریب کیفیت بالا و پایداری بالا و همچنین سایر ویژگی‌های عملکردی که به‌آسانی با نوسان‌سازهای الکترونیکی به دست نمی‌آیند، از مزایای این نوسان‌سازها است. در یک OEO ، برخلاف نوسان‌سازهای که با مشدد کریستال کوارتز و مشدد دی‌الکتریک ساخته می‌شوند، نویز فاز نوسان‌ساز با افزایش فرکانس نوسان، افزایش نمی‌یابد. در اکثر OEO ها از یک مدولاتور نوری همراه با یک المان ذخیره‌ساز انرژی که معمولاً یک خط تأخیر از جنس فیبر نوری است برای تبدیل انرژی نور به سیگنال‌های مایکروویو استفاده می‌کنند. نور

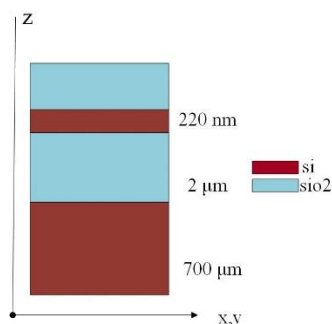
مشدها این است که مجتمع و از جنس سیلیکون هستند و این باعث می شود با فناوری CMOS سازگاری بالایی داشته باشند. در ادامه در بخش ۲، دو مشدد نوری مجتمع مبتنی بر براگ گریٹینگ طراحی و شبیه سازی می شوند. در بخش ۳، کاربرد این مشدها در تحقق نوسان ساز میکروویوفوتونیک مجتمع بررسی می شود و در بخش ۴ نویز فاز این نوسان سازها محاسبه می شود.

۲- طراحی و شبیه سازی مشدد نوری مجتمع

موجبر براگ گریٹینگ، یک جزء اساسی برای دستیابی به عملکردهای انتخابی طول موج در دستگاه های نوری متعددی مانند لیزرهای نیمه هادی و فیبر هستند. در شکل ۱ یک موجبر نوری مجتمع مبتنی بر براگ گریٹینگ یکنواخت که در نرم افزار Mode Solution Lumerical شبیه سازی شده، آورده شده است. برای شبیه سازی از ویفر SOI که ماده اصلی آن سیلیکون است استفاده شده است. ضریب انبساط حرارتی سیلیکون در محدوده $2.6 - 3.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ است. ضریب انبساط حرارتی سیلیکون به طور قابل توجهی کمتر از فلزات است. این باعث می شود برای کاربردهای توان بالا و دمای بالا در الکترونیک مناسب باشد؛ کهدر این ساختار ضریب شکست سیلیکون $3/477$ و ضریب شکست سیلیکون دی اکسید $1/444$ است.

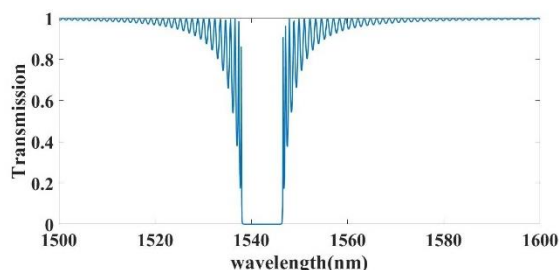


(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) تصویر یک موجبر نوری مجتمع مبتنی بر براگ گریٹینگ و (ب) سطح مقطع مربوط به موجبر نوری مبتنی بر براگ گریٹینگ



شکل ۲- نمودار انتقال بر حسب طول موج یک موجبر نوری مبتنی بر براگ گریٹینگ یکنواخت

لیزر به یک مدولاتور الکترونوری وارد می شود که خروجی آن از یک فیبر نوری بلند عبور می کند و با یک آشکارساز نوری به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود. خروجی آشکارساز نوری تقویت و فیلتر شده و به درگاه الکتریکی مدولاتور بازمی گردد. این سیستم از نوسانات خودپایدار، در فرکانسی که توسط طول فیبر نوری، مقدار بایاس مدولاتور و فرکانس مرکزی فیلتر میان گذر تعیین می شود نوسان می کند [۴].

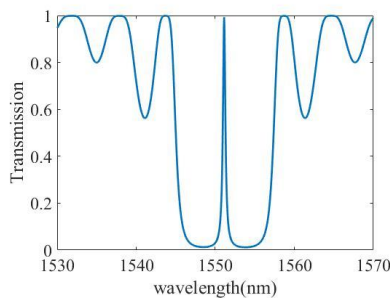
در سال های اخیر میکروویوفوتونیک مجتمع به دلیل ویژگی هایی مانند: پهنای باند زیاد، ابعاد بسیار کوچک و هزینه مورد توجه قرار گرفته اند [۵]. توسعه اخیر PIC ها بر اساس بسترهای مواد مختلف مانند نیمه هادی های V-III، لیتیوم نیوبات ($LiNbO_3$)، سیلیکون روی عایق (SOI°)، شیشه های با شاخص بالا، نیتrideها و پلیمرها چشم اندازهای جدیدی را برای مجتمع سازی بالقوه IMWP^۲ و به ویژه سیستم OEO باز کرده اند [۶]. مجتمع سازی کامل این سیستم ها پتانسیل قابل توجهی برای ارائه سیگنال های خالص با نویز فاز پایین در اندازه های بسیار فشرده دارد که در مقایسه با سیستم های OEO کلاسیک مزایای زیادی به همراه دارد را ارائه می دهد. پیشرفت های اخیر در این زمینه، مانند فیلتر یا خطوط تأخیر نوری مبتنی بر ایندیم فسفات (InP)، نتایج چشمگیری را نشان داد [۷]. با این وجود، سیلیکون فوتونیک به دلیل سازگاری با فرآیندهای ساخت و ابزارهای مورد استفاده در صنعت CMOS^۳ در حال حاضر به عنوان یکی از اصلی ترین پلتفرم های فناوری قابل دوام برای مدارهای فوتونیک با پیچیدگی بالا و مقیاس بزرگ در نظر گرفته می شود. علاوه بر این، کنتراست بالای شاخص هسته-پوشش موجبرهای فوتونیک سیلیکونی، ابعاد ساختار زیر میکرومتری، خمیدگی های محکم و فاصله های نزدیک را ممکن می سازد و به نوبه خود، این اجازه را می دهد تا بسته بندی متراکم از قطعات نوری بر روی سطح یک تراشه انجام شود. علاوه بر این، توسعه سریع مدارهای مجتمع فوتونیک سیلیکونی امکان عملکردهای متعدد را در یک تراشه واحد در فرکانس بالا فراهم می کند. در واقع، تمام بلوک های اساسی لازم برای حلقه OEO مانند لیزر، مدولاتور، آشکارساز نوری قبلاً در پلتفرم SOI پیاده سازی شده اند؛ بنابراین، ادغام بر روی پلتفرم SOI می تواند به عنوان یک راه حل امیدوارکننده برای پیاده سازی OEO های فوق فشرده در نظر گرفته شود [۸].

یکی از معایب نوسان سازهای میکروویوی این است که نویز فاز سیگنال نوسان، با فرکانس کار نوسان ساز افزایش می یابد. نوسان ساز OEO در سال ۱۹۹۴ ارائه شده است [۹]. نویز فاز سیگنال تولید شده در این نوسان سازها، با افزایش فرکانس کار، افزایش نمی یابد. نسل های اول OEO دارای مشکلاتی بودند. آن ها به دلیل نوسانات درجه حرارت فیبر، دچار رانش فرکانس می شدند که برای غلبه بر این مشکل به جعبه کنترل دما، با ابعاد بزرگ احتیاج بود. حلقه بسته نوری-الکترونیکی دارای چندین مود نوسانی ناشی از فیبر نوری با طول زیاد که به عنوان یک خط تأخیر استفاده می شد، باعث پرش فرکانس می شد. یک راه حل، جایگزینی خط تأخیر فیبر نوری با یک مشدد نوری با اندازه کوچک و ضریب کیفیت بالا است. برای چنین ساختارهایی، مشدد به عنوان قطعه ذخیره کننده انرژی یا مشدد در حلقه نوسانی عمل می کند [۱۰]. این روش کمک زیادی به کاهش اندازه OEO می کند. انواع مختلفی از مشدد های نوری مانند مشددهای فابری پرو [۱۱]، مشددهای حلقه فیبر [۱۲-۱۵] یا مشددهای (WGM) [۱۶] در OEO معرفی شده اند. با این حال، این مشددها معمولاً از نبود امکان مجتمع سازی رنج می برند، بنابراین از نظر مجتمع سازی OEO مناسب نیستند.

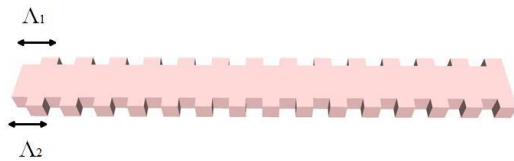
هدف اصلی این مقاله طراحی مشدد نوری مجتمع و کاربرد آن در نوسان ساز میکروویوفوتونیک است. برای این منظور از مشددهایی بر پایه براگ گریٹینگ (Bragg Gratings) استفاده شده است و عملکرد نوسان ساز میکروویوفوتونیک مجتمع مبتنی بر آن ها بررسی شده است. مزیت این

$$l_g n_1 + l_w n_2 = \frac{m \lambda_B}{2} \quad (2)$$

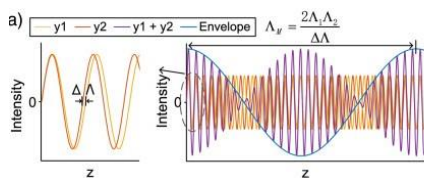
که در آن n_1 و n_2 ضریب شکست مؤثر ناحیه گریتینگ و ناحیه موجبر هستند. مرتبه m گریتینگ و λ_B طول موج براگ است. خروجی یک مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ با دوره تناوب ۳۲۳ نانومتر در شکل ۴ است. ساختار مربوط به یک مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ با دوره تناوب ۳۰۹/۸ نانومتر و طول ۱۵۴/۹ میکرومتر در نرم افزار Lumerical Mode Solution با استفاده از EME solver شبیه سازی شده است. نمودار انتقال مربوط به ساختار در شکل ۵ آورده شده است که شکل کلی آن مشابه به شکل ۴ است.



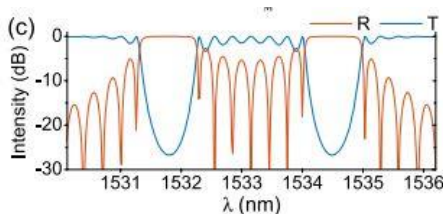
شکل ۵- نمودار انتقال بر حسب طول موج مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ



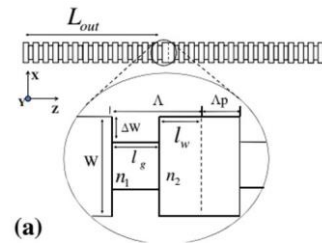
شکل ۶- شماتیک یک موجبر Moiré Bragg grating [۲۰]



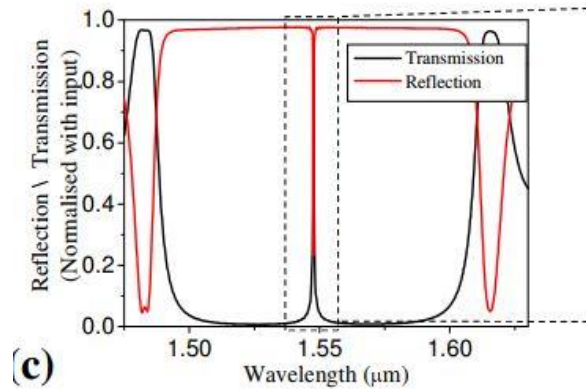
شکل ۷- چگونگی ایجاد یک پروفایل Moiré [۲۰]



شکل ۸- نمودار طیف انتقال و انعکاس یک مشدد Moiré براگ گریتینگ [۲۰]



شکل ۹- شماتیک یک مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ (نمای بالا) [۱۸]



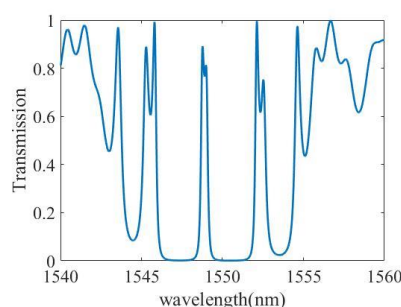
شکل ۱۰- نمودار انتقال و انعکاس بر حسب طول موج مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ [۱۸]

در ساده ترین حالت، براگ گریتینگ ساختاری با مدولاسیون ضریب شکست مؤثر در جهت انتشار نور در موجبر است. این مدولاسیون معمولاً با تغییر ضریب شکست یا تغییر ابعاد فیزیکی به دست می آید. در هر کدام از مرزها، انعکاس نور منتشر شونده رخ می دهد و فاز نسبی منعکس شده سیگنال توسط دوره تناوب براگ گریتینگ و طول موج نور تعیین می شود. تکرار مدولاسیون ضریب شکست مؤثر منجر به بازتاب های متعدد و توزیع شده می شود. سیگنال های منعکس شده فقط در یک نوار باریک در اطراف یک طول موج مشخص تداخل سازنده دارند که طول موج براگ نام دارد. در این محدوده، نور منعکس می شود. در طول موج های دیگر، بازتاب های متعدد به طور مخربی تداخل می کنند و هر کدام یکدیگر را خنثی می کنند؛ و در نتیجه نور از طریق موجبر منتقل می شود. پاسخ مربوط به یک براگ گریتینگ ساده با دوره تناوب ۳۱۲ nm که توسط نرم افزار Lumerical Mode solution شبیه سازی شده است در شکل ۲ نشان داده شده است. طول موج مرکزی که به نام براگ شناخته می شود به صورت رابطه (۱) است [۱۷].

$$\lambda_B = 2 \Lambda n_{eff} \quad (1)$$

۲-۱- مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ

می توان با ایجاد یک تغییر فاز بر روی دیواره یک براگ گریتینگ یک تشدید باند باریک را در نمودار انتقال مربوط به آن ایجاد کرد. شکل (۳) نمودار شماتیک دیوار جانبی عمودی یک مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ (phase shifted Bragg grating) را نشان می دهد. در شکل w و Δw به ترتیب نشان دهنده عرض و عمق گریتینگ هستند. Λ دوره تناوب توری و Λ_p طول شیفت فاز موج یک چهارم است [۱۸]. l_g طول دوره تناوب توری براگ و l_w تحت شرط براگ به صورت رابطه (۲) مرتبط هستند.



شکل ۹- نمودار انتقال بر حسب طول موج مشدد براگ

گریتینگ Moiré

همان‌طور که مشاهده می‌شود در طول موج ۱۵۴۹nm یک تشدید در باند توقف مربوط به پاسخ اتفاق افتاده است. طول موج سیگنال نوری در سیستم‌های میکروویوفوتونیک صرفاً نقش کریر دارند و مقدار مطلق آن چندان مهم نیست. آنچه مهم است این است که در طول موج نوری کار کنیم که نزدیک به طول موج حداقل تلفات فیبر نوری باشد (طول موج حدود ۱۵۵۰ نانومتر). ساختار شبیه‌سازی شده در نرم افزار EME Solver در طول موج ۱۵۴۹ نانومتر پاسخ بهتری دارد و با توجه به محدودیت‌های که در شبیه‌سازی این ساختار وجود داشت رسیدن به طول موج ۱۵۵۰ نانومتر میسر نشد گرچه با توضیحات بالا طول موج ۱۵۴۹ نانومتر با ۱۵۵۰ نانومتر برای این کاربرد تفاوتی ندارد.

۲-۲- مشدد Moiré براگ گریتینگ

مشددهای Moiré براگ گریتینگ (Moiré Bragg grating) بر اساس اثر Moiré هستند [۱۹]. یک پترن Moiré، یک پترن تداخلی است که زمانی که دو ساختار متناوب که مشخصات کاملاً یکسانی دارند ولی دوره تناوب آن‌ها متفاوت است در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند به وجود می‌آید و پترن آن‌ها یک رفتار کسینوسی دارد که دوره تناوب آن طبق رابطه (۳) است [۲۰].

$$\Lambda_M = \frac{2\Lambda_1\Lambda_2}{\Delta\Lambda} \quad (3)$$

که در این رابطه Λ_1 دوره تناوب دیواره بالایی ساختار، Λ_2 دوره تناوب دیواره پایینی ساختار و $\Delta\Lambda$ اختلاف بین دوره تناوب‌ها است.

برای اضافه کردن اثر Moiré مانند شکل ۵ به دیواره‌های موجبر براگ گریتینگ، یک تفاوت کوچک بین دوره تناوب دو دیواره کناری موجبر وجود دارد. با این روش آفست بین این دو sub-grating به صورت متناوب در طول موجبر از مقدار صفر تا مقدار ماکزیمم آن که نصف دوره تناوب گریتینگ است تغییر می‌کند. توزیع قدرت مربوط به گریتینگ کلی یک پترن به صورت Moiré دارد که پریود آن نصف پریود Moiré اصلی است و فاز گریتینگ در نقاط تقاطع به اندازه π تغییر می‌کند و در نتیجه آن یک تشدید تیز در طول موج براگ در نمودار انتقال آن به وجود می‌آید. در شکل ۷ چگونگی ایجاد یک پروفایل Moiré نشان داده شده است. خروجی یک مشدد Moiré براگ گریتینگ با دوره تناوب‌های ۳۱۱ نانومتر و ۳۱۱/۹ نانومتر در شکل ۸ آمده است. ساختار مربوط به یک مشدد Moiré براگ گریتینگ با دو دوره تناوب ۳۳۶/۲ و ۳۳۷ نانومتر و طول ۲۰/۱۶ میکرومتر در نرم‌افزار Lumerical Mode Solution با استفاده از EME solver شبیه‌سازی شده است. نمودار انتقال مربوط به ساختار در شکل ۹ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طول موج ۱۵۴۹nm یک تشدید در باند توقف مربوط به پاسخ اتفاق افتاده است. در جدول ۱ مقایسه‌ای بین چند مشدد مطرح شده، انجام شده است.

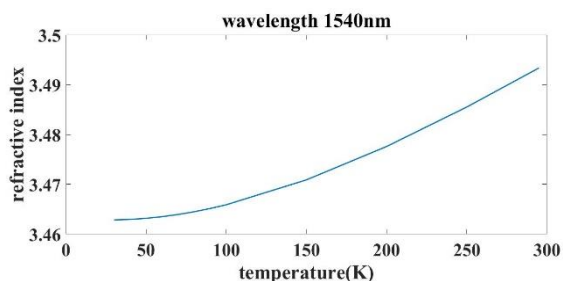
جدول ۱- مقایسه بین چند مشدد

جنس	ابعاد	نوع مشدد	نام مشدد
شیشه	۵۰mm	غیر مجتمع	فابری پرو مشدد
فیبر نوری	۱۰۰mm	غیر مجتمع	مشدد حلقه فیبر
منیزیم فلورید	۴mm	غیر مجتمع	WGM
فیبر نوری	۷۸mm	غیر مجتمع	فایبر براگ FBG گریتینگ
سیلیکون	۲۰μm	مجتمع	مشدد حلقه‌ای
سیلیکون	۶μm	مجتمع	مشدد میکرو دیسک
سیلیکون	۲۰۰μm	مجتمع	موجبر WGM براگ گریتینگ

در کارهای قبلی که از مشدد WGM استفاده شده است که این نوع مشدد منجر به نویز فاز کمتری می‌شود ولی قابلیت مجتمع سازی را ندارد و از نظر ابعاد نیز دارای ابعاد بسیار بزرگتری است که در این کار از مشددهای با ابعاد کوچکتر در مقیاس نانومتر استفاده شده است که قابلیت مجتمع سازی را دارا هستند همچنین این مشدد از جنس سیلیکون است بنابراین با تکنولوژی CMOS سازگار است.

۲-۳- تأثیر دما بر عملکرد مشددها

تغییر جزئی دما باعث تغییر طیف انتقال دستگاه‌های فوتونیک مانند مشددهای براگ گریتینگ خواهد شد. وابستگی دما را می‌توان به صورت تقریبی به صورت $\beta = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ تخمین زد که برای سیلیکون $\beta = 5.2 \times 10^{-5} K^{-1}$ است. همچنین ضریب نوری-حرارتی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر برابر با $\frac{dn}{dT} = 1.8 \times 10^{-4} K^{-1}$ است. ضریب شکست مربوط به سیلیکون در طول موج‌های متفاوت و در دماهای متفاوت دارای مقادیر متفاوتی است. نمودار ضریب شکست سیلیکون در طول موج‌های ۱۵۴۰ نانومتر و ۱۵۵۰ نانومتر در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ رسم شده است. نمودار انتقال مربوط به مشددها به ازای دماهای مختلف در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه دما کمتر باشد تشدید در طول موج کمتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۰- نمودار ضریب شکست سیلیکون بر حسب دما در طول موج ۱۵۴۰ نانومتر

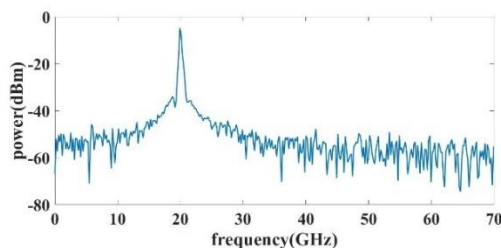
۳- نوسان ساز میکروویوفوتونیک

در شکل ۱۲ یک OEO با استفاده از مشدد نوری آورده شده است. در این شکل لینک میکروویوفوتونیک شامل تداخل سنج ماخ-زندر که به دلیل سهولت در طراحی و ساخت یکی از پرکاربردترین عناصر قابل استفاده در مدارات نوری است [۲۱]، مشدد نوری و آشکارساز نوری است و قسمت RF آن شامل فیلتر میان گذر و تقویت کننده است. با توجه به شکل ۱۴ عملکرد OEO به این صورت است که نور لیزر توسط مدولاتور MZM^{10} مدوله می شود و سپس نور مدوله شده وارد مشدد نوری می شود. نور خارج شده از مشدد نوری وارد آشکارساز نوری می شود و در آنجا به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود. بعد از آن از یک فیلتر میان گذر عبور می کند سپس سیگنال الکتریکی توسط تقویت کننده، تقویت می شود و وارد دهانه الکتریکی مدولاتور کترنوری می شود و این روند تکرار می شود و باعث تولید سیگنال الکتریکی می شود.

۳-۱ نوسان ساز میکروویوفوتونیک با مشدد تغییر فاز دهنده براگ

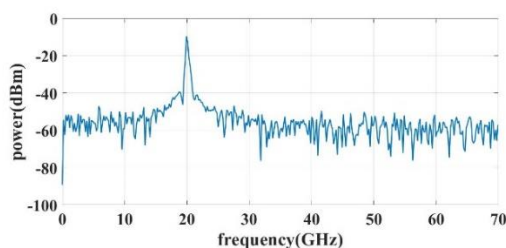
گریتینگ و Moiré براگ گریتینگ

نوسان ساز میکروویوفوتونیک با استفاده از مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ و Moiré براگ گریتینگ در شکل ۱۵ نشان داده شده است. خروجی نوسان ساز با مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ در شکل ۱۶ نشان داده شده است و خروجی نوسان ساز با مشدد Moiré براگ گریتینگ در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود هر دو نوسان ساز در فرکانس ۲۰ GHz نوسان می کنند. عامل محیطی تأثیرگذاری که در این مقاله بررسی شده است اثر دررفت بایاس (Bias drift) بر توان خروجی نوسان ساز است که در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ آورده شده است.



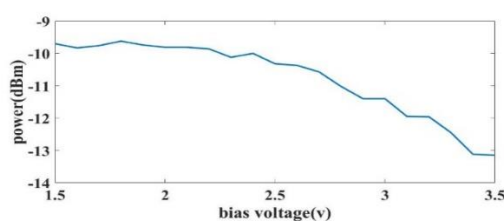
شکل ۱۶- توان خروجی بر حسب فرکانس OEO شبیه سازی شده با

مشدد تغییر دهنده فاز براگ گریتینگ



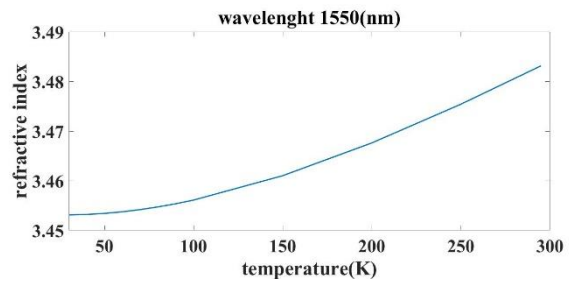
شکل ۱۷- توان خروجی بر حسب فرکانس OEO شبیه سازی با مشدد

moiré براگ گریتینگ

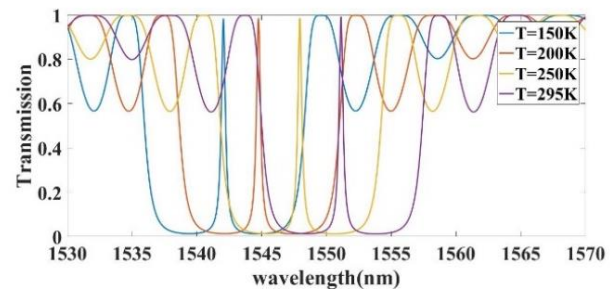


شکل ۱۸- میزان توان خروجی نوسان ساز مبتنی بر مشدد تغییر فاز

دهنده براگ گریتینگ بر حسب ولتاژ بایاس

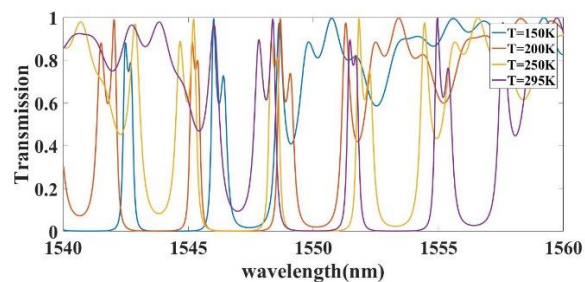


شکل ۱۱- نمودار ضریب شکست سیلیکون بر حسب دما در طول موج ۱۵۴۰ نانومتر



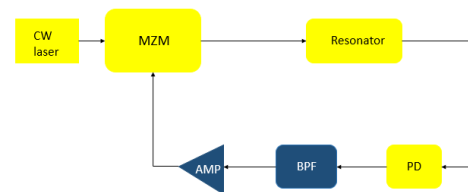
شکل ۱۲- نمودار انتقال مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتینگ

بر حسب طول موج در دماهای متفاوت

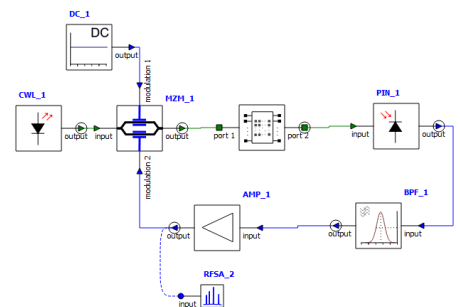


شکل ۱۳- نمودار انتقال مشدد Moiré براگ گریتینگ

بر حسب طول موج در دماهای متفاوت



شکل ۱۴- OEO با استفاده از مشدد نوری مجتمع



شکل ۱۵- OEO شبیه سازی شده با مشدد تغییر فاز دهنده براگ

گریتینگ و مشدد Moiré براگ گریتینگ

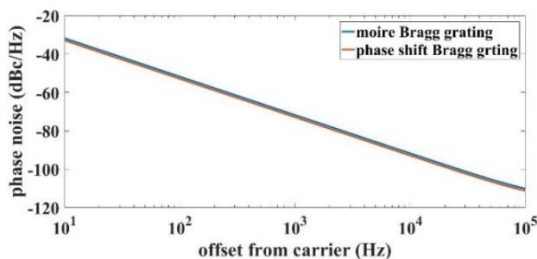
$$b_{-} = Fk_B T_{-} / P_{RF} \quad b_{-1} = constant$$

در این رابطه F معرف عدد نویز است، $k_B = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ ثابت بولتزمن است، $T_{-} = 290 K$ دمای استاندارد اتاق است و P_{RF} توان سیگنال خروجی نوسان ساز است. چگالی طیف توان مربوط به نویز تقویت کننده که شامل نویز حرارتی، نویز RIN و نویز shot است، طبق رابطه (۹) نوشته می شود.

$$S_{\Psi_{opt}} = \left(k_B T_{-} + \langle I_D \rangle^2 N_{rin} R + 2q \langle I_D \rangle R \right) / P_{RF} \quad (9)$$

در این رابطه $\langle I_D \rangle$ متوسط جریان PD است، $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ بار الکترون است و N_{rin} نویز RIN لیزر است. با جایگذاری روابط (۸)–(۱۰) در رابطه (۷) می توان نمودار نویز فاز یک نوسان ساز را به دست آورد. مثلاً متوسط جریان PD با پاسخ دهی $0.7 A/W$ طبق رابطه $r_d = P_I r_d / 2$ $\langle I_D \rangle$ محاسبه می شود. اگر $P_I = 400 mW$ توان نور لیزر باشد آنگاه $\langle I_D \rangle = 140 mA$ به دست می آید. برای یک لیزر DFB¹¹، $N_{rin} = -165 dBc/Hz$ مقدار مرسوم می است. چنانچه $R = 50 \Omega$ فرض شود آنگاه $P_{RF} = 46.21 m$ خواهد بود. بنابراین طبق رابطه (۱۰) مقدار $S_{\Psi_{opt}} = 7.2 \times 10^{-16} rad/Hz$ به دست می آید. در مورد تقویت کننده $b_{-} = 3.2 \times 10^{-16} rad^2/Hz$ و $b_{-1} = 10^{-12} rad^2/Hz$ و مقادیر متداولی هستند. یک فیلتر مایکروویو با ضریب کیفیت $Q_f = 2000$ نیز مورد استفاده قرار می گیرد [۲۴].

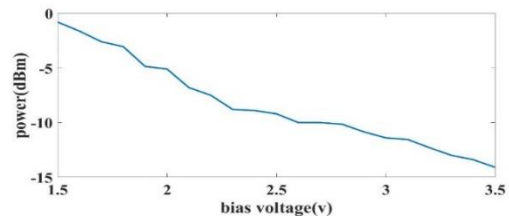
نمودار نویز فاز OEO با مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتنینگ و مشدد Moiré براگ گریتنینگ در شکل ۲۱ رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود این نوسان ساز با مشدد نوری مجتمع دارای نویز فاز در حدود $-93 dBc/Hz$ در انحراف فرکانسی $10 kHz$ از فرکانس نوسان $20 GHz$ است. تفاوت چندانی در نویز فاز نوسان سازهای با دو مشدد نوری مختلف وجود ندارد.



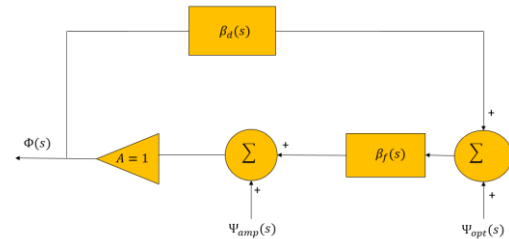
شکل ۲۱- نمودار نویز فاز نوسان ساز مبتنی بر مشدد Moiré براگ گریتنینگ و نوسان ساز مبتنی بر مشدد تغییردهنده فاز براگ گریتنینگ

۵- نتیجه گیری

در این مقاله دو مشدد نوری مجتمع مبتنی بر موجبر براگ گریتنینگ طراحی و شبیه سازی شدند. هر دو مشدد در طول موج $1549 nm$ دچار تشدید می شوند. از این دو مشدد برای تحقق نوسان ساز مایکروویو فوتونیک استفاده شد و نوسان ساز مایکروویو فوتونیک مبتنی بر این دو مشدد در فرکانس $20 GHz$ دارای نوسان هستند. این نوسان سازهای با مشدد نوری مجتمع دارای نویز فاز در حدود $-93 dBc/Hz$ در انحراف فرکانسی $10 kHz$ از فرکانس نوسان $20 GHz$ است. گرچه نوسان ساز با مشدد تغییر فاز دهنده براگ گریتنینگ دارای نویز فاز تقریباً بهتری نسبت به نوسان ساز با استفاده از مشدد Moiré براگ گریتنینگ است ولی این تفاوت زیاد نیست و در حدود $1 dB$ است. در آینده می توان نویز فاز که در اثر پاشندگی مربوط به مشددها است را در نویز فاز کلی لحاظ کرد و نویز فاز نوسان ساز را با دقت بیشتری محاسبه کرد. همچنین امکان تحقق این نوع نوسان ساز با فرکانس نوسان در فرکانس های مختلف مایکروویو و موج میلی



شکل ۱۹- میزان توان خروجی نوسان ساز مبتنی بر مشدد Moiré براگ گریتنینگ بر حسب ولتاژ بایاس



شکل ۲۰- مدل سازی یک نوسان ساز مایکروویو فوتونیک با مشدد نوری در فضای فاز

۴- محاسبه نویز فاز با استفاده از مدل لیسون

مدل لیسون به دلیل ساده بودن و جامع بودن نسبت به سایر مدل ها برای محاسبه نویز فاز نوسان سازها بیشتر از سایر مدل ها مورد استفاده قرار می گیرد [۲۲]. برای استفاده از مدل لیسون برای محاسبه نویز فاز نوسان ساز می توان نوسان ساز را مطابق شکل ۲۰ مدل کرد. در این شکل، $\Psi_{amp}(s)$ نویز فاز ناشی از تقویت کننده و $\Psi_{opt}(s)$ نویز ناشی از لینک مایکروویو فوتونیک است. با ضرب $\Psi_{amp}(s)$ در تابع تبدیل خودش که $H_{\downarrow}(s)$ و $\Psi_{opt}(s)$ در تابع تبدیل خودش که $H_{\uparrow}(s)$ است و با استفاده از رابطه (۴) می توان نویز فاز خروجی نوسان ساز را به دست آورد [۲۳].

$$\Phi(s) = H_{\downarrow}(s) \Psi_{amp}(s) + H_{\uparrow}(s) \Psi_{opt}(s) \quad (4)$$

در این رابطه $\Phi(s)$ نویز فاز خروجی است. رابطه (۴) را می توان به صورت رابطه (۵) بازنویسی نمود که بیانگر رابطه چگالی طیف توان نویز فاز ورودی و خروجی است.

$$S_{\Phi}(\omega) = |H_{\downarrow}(j\omega)|^2 S_{\Psi_{amp}}(\omega) + |H_{\uparrow}(j\omega)|^2 S_{\Psi_{opt}}(\omega) \quad (5)$$

که در این رابطه $S_{\Psi_{amp}}(\omega)$ چگالی طیف توان نویز تقویت کننده، $S_{\Psi_{opt}}(\omega)$ چگالی طیف توان نویز ناشی از لینک مایکروویو فوتونیک، $S_{\Phi}(\omega)$ چگالی طیف توان نویز فاز خروجی هستند. رابطه (۵) می توان را به صورت رابطه (۶) نوشت.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\Delta\omega) &= 10 \log \left(\frac{S_{\Phi}(\Delta\omega)}{2} \right) \\ &= 10 \log \left(\frac{|H_{\downarrow}(j\Delta\omega)|^2 S_{\Psi_{amp}}(\Delta\omega)}{2} + \frac{|H_{\uparrow}(j\Delta\omega)|^2 S_{\Psi_{opt}}(\Delta\omega)}{2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

در این رابطه $\mathcal{L}(\Delta\omega)$ نویز فاز است. چگالی طیف توان نویز فاز تقویت کننده طبق رابطه (۷) به دست می آید.

$$S_{\Psi_{amp}}(f) = b_{-} + b_{-1} f^{-1} \quad (7)$$

- [10] L. Maleki, "The Opto-Electronic Oscillator (OEO): Review and recent progress," in *European Frequency and Time Forum*, Gothenburg, Sweden, 2012.
- [11] Marcus Bagnell and Peter J. Delfyett, "Optoelectronic Oscillator Using an Ultra-High Finesse Fabry-Perot Etalon as a Photonic Filter for Low Phase Noise at High Oscillating Frequencies," in *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, Alexandria, VA, USA, 2013.
- [12] Saleh, K., Merrer and P. H., Llopis, "Optoelectronic oscillator based on fiber ring resonator: Overall system optimization and phase noise reduction," in *IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings*, Baltimore, MD, USA, 2013.
- [13] Li, Ming, et al. "Tutorial on optoelectronic oscillators." *APL Photonics* 6.6 (2021): 061101.
- [14] Hao, Tengfei, et al. "Recent advances in optoelectronic oscillators." *Advanced Photonics* 2.4 (2020): 044001.
- [15] Ilgaz, Mehmet Alp, and Bostjan Batagelj. "Opto-electronic oscillators for micro-and millimeter wave signal generation." *Electronics* 10.7 (2021): 857.
- [16] A. Savchenkov, V. S. Ilchenko and J. Byrd, "Whispering gallery mode based optoelectronic microwave oscillator," *Journal of Modern Optics*, vol. 50, pp. 2523-2542, 2008.
- [17] Dirk Taillaert, Harold Chong and Peter I. Borel, "A compact two-dimensional grating coupler used as a polarization splitter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 9, p. 1249-1251, 2003.
- [18] P. Prabhathan, V. M. Murukeshan, Zhang Jing and Pamidighantam V, "Compact SOI nanowire refractive index sensor using phase shifted Bragg grating," *Optical Society of America*, vol. 17, no. 17, pp. 15330-15341, 2009
- [19] D. Reid, C. Ragdale and I. Bennion, "Phase-shifted Moire grating fibre resonators," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 1, p. 10-12, 1990.
- [20] N. A. F. Jaeger and L. Chrostowski, "fully tailorable integrated-optic resonators based on chirped waveguide Moiré gratings," *Optica*, vol. 7, no. 6, pp. 647-657, 2020.
- [۲۱] مسعود کامران کشتیبان، کامبیز عابدی و محمد جواد شریفی، «طراحی مفهومی فیلتر نوری ماخ-زندر مبتنی بر بلور فوتونی دو بعدی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۹، شماره ۱، صفحه ۲۲۸-۲۳۱، ۱۳۹۸.
- [22] Enrico Rubiola, *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators*, UK: Cambridge University Press.
- [23] S. Esmail Hosseini, Ali Banai and Franz X. Kärtner, "Low-drift optoelectronic oscillator based on a phase modulator in a sagnac loop," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 7, pp. 2617-2624, 2017.
- [24] MandanaJahanbozorgi, S.Esmail Hosseini, SajadJahanbakht and KambizJamshidi, "Dispersion effects on the performance of whispering gallery mode based optoelectronic oscillators," *Optics & Laser Technology*, vol. 135, 2021

متری وجود دارد و تنها عامل محدودکننده پهنای باند قطعات فوتونیک و مایکروویوی استفاده شده در حلقه نوسان ساز است. با توجه به شکل مشددهای شبیه سازی شده در این مقاله که در آن ها دندانه های بسیار زیاد با ابعاد بسیار کوچک در مقیاس نانومتر است ساخت این نوع مشددها دشوار است. همچنین به دلیل محدودیت های فناوری، امکان مجتمع سازی همه المان ها با استفاده از سیلیکون وجود ندارد (به عنوان مثال امکان تحقق لیزر مجتمع مبتنی بر سیلیکون وجود ندارد). بنابراین برای مجتمع سازی همه قطعات موجود در ساختار امکان استفاده از فناوری مجتمع سازی monolithic مبتنی بر سیلیکون وجود ندارد و بایستی از فناوری های مجتمع سازی Hybrid یا Homogeneous استفاده شود.

مراجع

- [1] Guillaume De Giovanni and Michel Chomiki, "New phase noise measurement techniques & ultra-low noise SAW oscillators," in *10.1109/FREQ.2010.5556361*, Newport Beach, CA, USA, 2012.
- [2] Vincent Giordano, Christophe Fluhr and Serge Grop and Benoît Dubois, "Tests of Sapphire Crystals Manufactured With Different Growth Processes for Ultra-Stable Microwave Oscillators," *IEEE*, vol. 64, no. 1, pp. 78 - 85, 2016.
- [3] B. Lin, Bo Lin, Biwei Pan, Zheng Zheng and Ming Li and Swee Chuan Tjin, "A review of photonic microwave generation," in *IEEE Optoelectronics Global Conference*, Shenzhen, China, 2016.
- [4] Ilchenko, "Miniature oscillators based on optical whispering gallery mode resonators, Frequency Control Symposium," in *IEEE International Frequency Control Symposium*, Honolulu, HI, USA, 2008.
- [۵] شهریار فرهادی، مهدی میری و محمد حسین شیخی، «کوچک سازی و افزایش پهنای باند تفکیک کننده قطبش ماخ - زندر با استفاده از تزویجگر چندمد غیریکنواخت»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۹، شماره ۲، صفحه ۷۴۵-۷۳۵، ۱۳۹۸.
- [6] Zhou Fang, Qiu Yu Chen and Ce Zhou Zhao, "review of recent progress in lasers on silicon," *Optics & Laser Technology*, no. 46, p. 103-110, 2013.
- [7] G. T. Reed, G. Mashanovich and F. Y. Gardes, "Silicon optical modulators," *Nature Photonics*, no. 4, p. 18-526, 2010.
- [8] Molly Piels and John Edward Bowers, "Photodetectors for silicon photonic integrated circuits," *University of California Santa*, pp. 4-30, 2016.
- [9] Yao and L Maleki, "A Novel High frequency optical subcarrier generator," *Electronics Letters*, vol. 30, no. 18, pp. 1525 - 1526,, 1994.

* Integrated microwave photonic

⁷ Complementary Metal-Oxide Semiconductor

⁸ Lumerical Mode Solution

⁹ Radio Frequency

¹⁰ Mach-Zehnder modulator

¹¹ Distributed feedback Laser

^۱ Surface accoustic wave

^۲ Whispering gallery mode

^۳ Optoelectronic Oscillator

^۴ Photonic integrated circuit

^۵ silicon on insulator