



بررسی طیف نوری میکرو تشدیدگرهای حلقوی با اضافه کردن تقویت کننده در حلقه ها

شهناز محمدی^۱، علی پورزیاد^۲، سعید نیک مهر^۳،

^۱ کارشناسی ارشد مخابرات نوری دانشگاه تبریز، shahnazmohammadi69@gmail.com

^۲ استادیار دانشگاه تبریز، ali_pourziad@tabrizu.ac.ir

^۳ استاد دانشگاه تبریز، nikmehr@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این مقاله با استفاده از نرم افزار کامسول، با اضافه کردن تقویت کننده به ساختار تشدیدگرهای حلقه ایی در یک ساختار دلخواه که دارای یک طیف فرکانسی عبوری در پنجره مخابراتی است، به یک طول موج رزوناتوری در طول موج ۱۵۵۵ نانومتر دست یافته شده است که همزمان تقویت میشود. با تغییر اندازه های حلقه ها در ساختار های موازی و متوالی در یک آرایه رزوناتوری و تغییر مکان تقویت کننده در ساختار حلقه ها به یک ساختار بهینه دست یافته شده که به تقویتی در حدود ۴۰ دسی بل رسیده است. تقویت کننده ای که به این ساختار اضافه شده پیشنهاد شده است تقویت کننده های ناخالصی، مثل داپد کردن قسمتی از حلقه به وسیله اتم های اربیم یا تقویت کننده های نیمه هادی.

واژه های کلیدی: تشدیدگر حلقه ایی، تقویت کننده، پنجره مخابراتی

۱. مقدمه

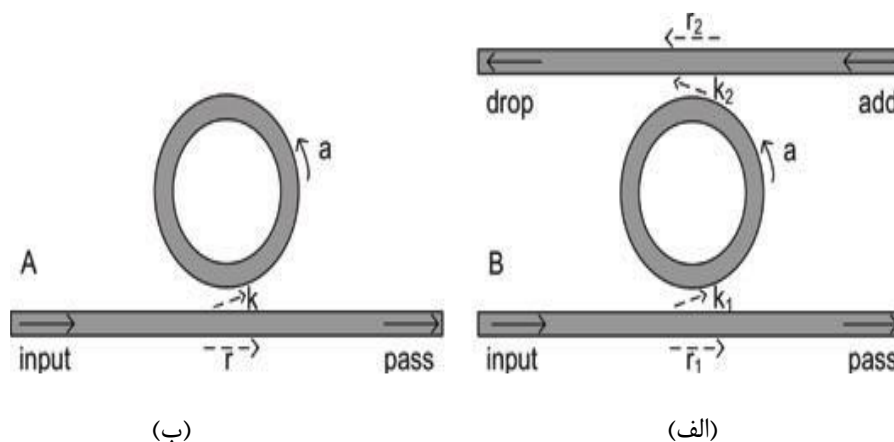
میکرو تشدیدگر های حلقه ای، توسعه یافته تشدیدگرهای حلقه ای نوری فیبره است که در ساینز میکرومتر است [۱-۲]. ساینز کوچک، خاصیت فیلترینگ و پتانسیل آنها برای استفاده در ساختارهای پیچیده بخصوص در مدارهای مجتمع نوری و فوتونی باعث ایجاد توجه زیادی به این قطعه نوری شده است [3-5].

اولین تشدیدگرهای حلقه ای موجبری توسط Ulrich و Weber در سال ۱۹۷۱ به نمایش در آمد [۶-۸]. جنس این تشدیدگر از شیشه بود که دارای ناخالصی رودنیوم با شعاع ۳۱.۴ میلی متر بود. دومین تشدیدگر توسط Haavisto and Parjer در سال ۱۹۸۰ ساخته شد [۳]. در سال ۱۹۸۲، Stokes و همکارانش اولین فیبر نوری حلقه ای را در طول موج ۶۳۲.۸ نانومتر ساختند. اولین تشدیدگر کوپل شده به موجبر در سال ۱۹۹۷، در دانشگاه Northwestern ساخته شد و اولین میکرو رزوناتور بود که با شعاع ۳۲.۸ میکرو ساخته شد.

از سال ۲۰۰۸ تاکنون، Yupapin و همکارانش، با استفاده از میکرو حلقه ها برای کاربردهایی مانند تولید پالس های آتو ثانیه [۱۱]، توقف نوری و ذخیره سازی [۱۲]، تولید حالت های فوتونی در هم تنیده [۱۳]، تولید پالس های نوری تراهرتز [۱۴]، [۱۵]، به دام انداختن فوتون [۱۶] و در حوزه پزشکی و درمان کار میکنند [۱۷-۱۹].

۲. تئوری حلقه تشدیدگر

حلقه تشدیدگر به دو دسته تقسیم می شود [۲۰]: ۱. حلقه تشدید گر تمام عبوری یا ناچ فیلتر، ۲. حلقه تشدید گر اد_دراپ. در شکل ۱ تصویر شماتیکی از انواع حلقه تشدیدگر از جمله حلقه تشدیدگر تمام عبوری یا ناچ فیلتر و حلقه تشدیدگر اد_دراپ نشان داده شده است [۲۰].



شکل ۱: حلقه تشدیدگر (الف) ناچ فیلتر و (ب) اد_دراپ [۲۰].

حلقه تشدیدگر تمام عبوری یا ناچ فیلتر شامل یک موجبر و یک حلقه است و حلقه تشدیدگر اد_دراپ شامل دو موجبر در دو طرف حلقه است. [۲۰]. معادلات مربوط به میزان تزویج و عبوری میدان، در ناچ فیلتر به صورت زیر است [۲۰]:

$$\frac{E_{pass}}{E_{input}} = \exp j(\pi + \phi) * \frac{a - r \exp j(\phi)}{1 - ra \exp j(\phi)} \quad (1)$$

$$\phi = \beta L \quad (۲)$$

$$a^2 = \exp(-\alpha L) \quad (۳)$$

L طول محیط حلقه است، α ضریب تضعیف حلقه است.

$$T_n = \frac{I_{pass}}{I_{input}} = \frac{a^2 - 2ra \cos \phi + r^2}{1 - 2ar \cos \phi + (ra)^2} \quad (۴)$$

r ضریب کوپلینگ خودی، k ضریب کوپلینگ متقابل است.

$$r^2 + k^2 = 1 \quad (۵)$$

معادله (۳-۲۵) برای حالتی است که تلفات در حین کوپلینگ رخ ندهد.

$$\lambda_{res} = \frac{n_{eff} L}{m} \quad (۶)$$

معادلات مربوط به تزویج در حلقه تشدیدگر اد-دراپ به صورت زیر است [۲۰]:

$$T_p = \frac{I_{pass}}{I_{input}} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + r_1^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (۷)$$

$$T_d = \frac{I_{drop}}{I_{input}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos \phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (۸)$$

T_p, T_d به ترتیب نسبت میزان شدتی از سیگنال که از پورت دراپ و عبوری، عبور می‌کند. به ترتیب ضریب تزویج خودی در موجبر اول و دوم است. ϕ در معادله ۳ تعریف شده و a ضریب تضعیف حلقه است. ویژگی‌های طیف بهره عبارت است از [۲۰]:

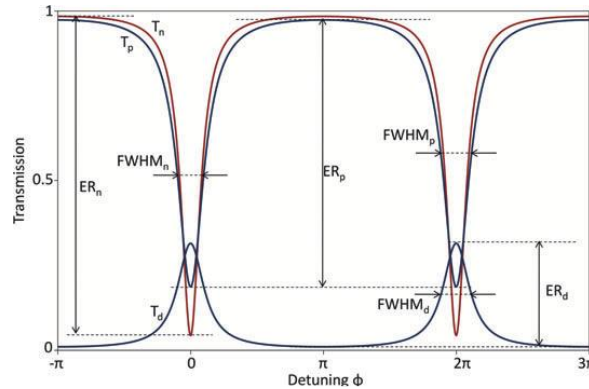
(۱) پهنای کامل در نصف توان (FWHM)

(۱) معادله پهنای باند نصف توان برای ناچ فیلتر

$$FWHM = \frac{(1-ra)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{ra}} \quad (9)$$

۲) معادله پهنای باند نصف توان برای اد-دراپ

$$FWHM = \frac{(1-r_1 r_2 a)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}} \quad (10)$$



شکل ۲- طیف عبوری یک حلقه ای و دو حلقه ای بر حسب تغییرات فاز [۲۰].

۲) رنج طول موج بین دو رزونانس یا طیف آزاد (FSR)

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g L} \quad (11)$$

همانطور که در معادلات (۹) تا (۱۱) نشان داده شده است، دو ویژگی FWHM و FSR وابسته به ضریب شکست موثر نیست، بلکه وابسته به ضریب شکست گروه است.

$$n_g = n_{eff} - \lambda_0 \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \quad (12)$$

n_{eff} ضریب شکست موثر و λ_0 طول موج در فضای آزاد است.

۲) نسبت FSR به FWHM مقدار Finesse را می دهد.

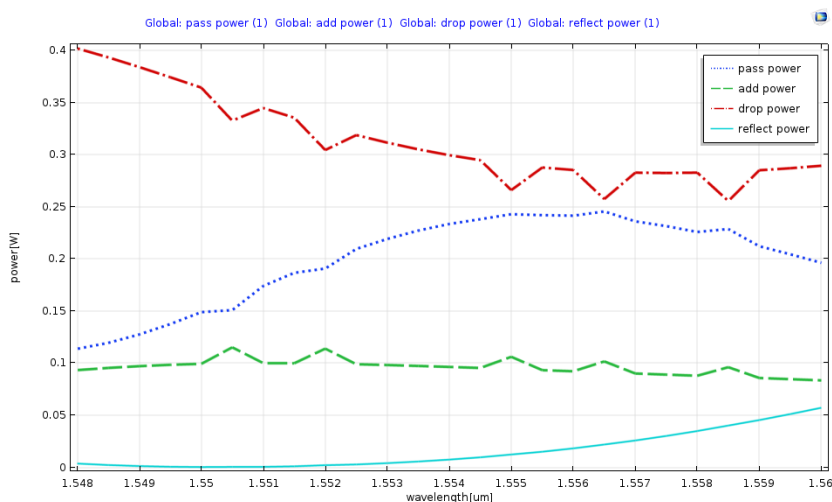
۳) فاکتور کیفیت نیز به صورت زیر مشخص می شود.

$$Q_factor = \frac{\lambda_{res}}{FWHM} \quad (13)$$

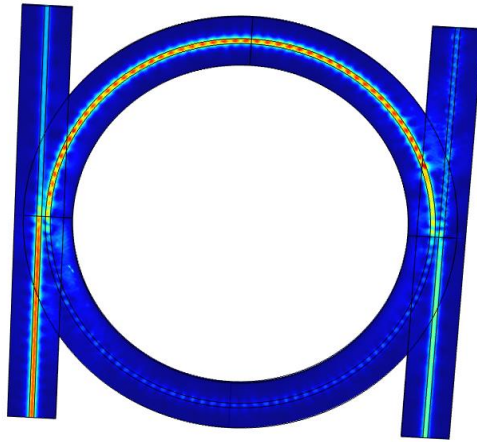
۳. بررسی نتایج توسط شبیه سازی

در این قسمت، به بررسی ساختارهای متفاوت حلقه تشدیدگر اد_دراپ پرداخته می‌شود که در قسمتی از حلقه، از تقویت کننده استفاده شده است.

در مرحله اول به بررسی حلقه تشدیدگر اد_دراپ تک حلقه‌ای که تقویت کننده‌ای ندارد، پرداخته می‌شود و فاصله تزویج بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. فاصله بهینه با شبیه سازی توسط نرم افزار کامسول بدست آمده است، زیرا فاصله تزویج فرمول ریاضی ندارد و باید با کم و زیاد کردن فاصله بین موجرها و حلقه، آن را بدست آورد. در چند شبیه سازی که در کامسول انجام شده است طیف بهره عبوری، اد، دراپ و انعکاسی نشان داده شده است. طیف بهره از ۱۵۴۸ تا ۱۵۶۰ نانومتر محاسبه شده است. دلیل انتخاب، بودن پنجره ی مخابراتی در این فاصله است. ساختار دارای شعاع $7/8$ میکرومتر، طول موجبر ۱۶ میکرومتر، عرض موجبر ۰.۲ میکرومتر، ارتفاع موجبر ۰.۲ میکرومتر است و فاصله شکاف بهینه به دست آمده ۰.۱۵۸ میکرومتر است که این طیف را به خوبی از خود عبور می‌دهد. طیف تشدیدگر در شکل ۳ و توزیع میدان در شکل ۴ نشان داده است.

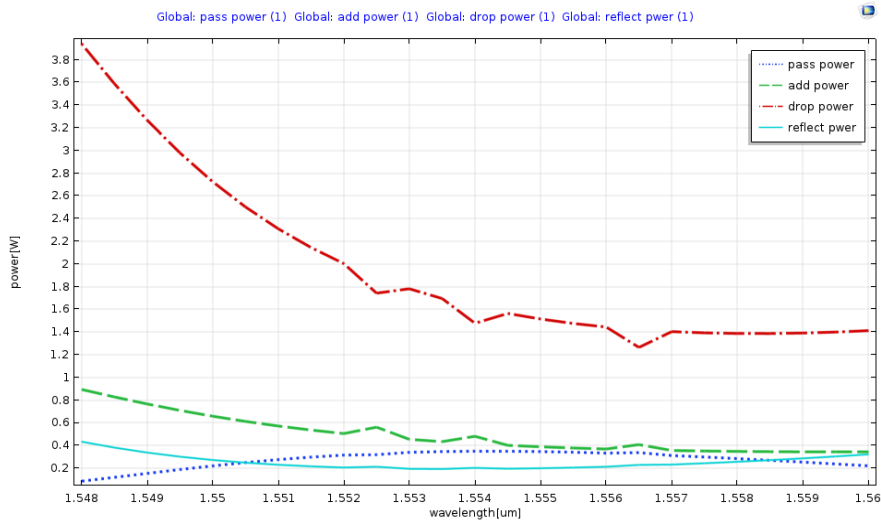


شکل ۳- طیف بهره در فاصله شکاف ۰.۱۵۸ میکرومتر



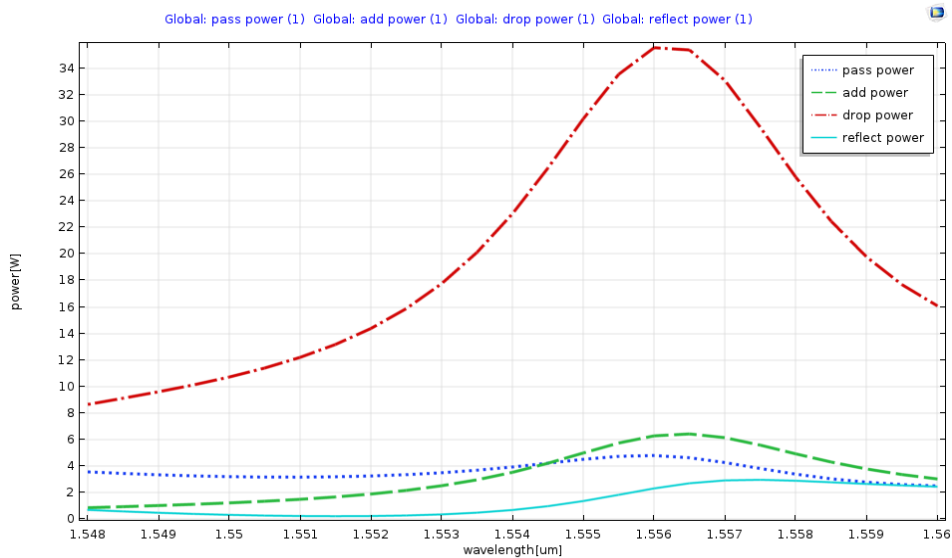
شکل ۴- توزیع میدان الکتریکی در فاصله شکاف ۰.۱۵۸ میکرومتر

در این تحقیق، یک چهارم ساختار حلقه از صفر درجه تا ۹۰ درجه، به تقویت کننده اختصاص داده شده است. ضریب شکست ناحیه ی تقویت کننده، n همان n' سیلیکون است که قرار داده شده و به n'' مقدار -0.02 اعمال شده است که تقویت کننده را شبیه سازی کند. تقویت کننده ایی که بتوان در مسیر حلقه اضافه کرد شامل تقویت کننده های ناخالصی مثل اربیم داپد و تقویت کننده نیمه هادی است.



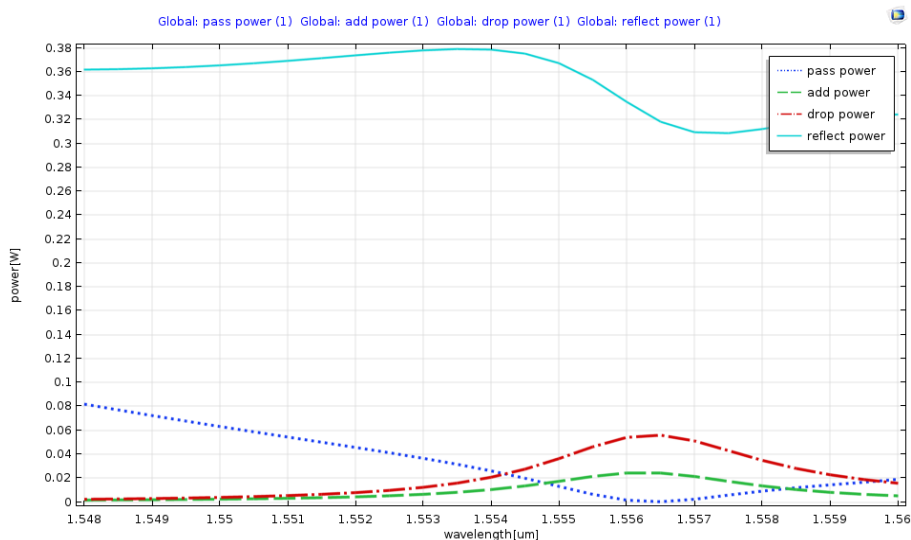
شکل ۵- طیف بهره در حالت تقویت کننده در ربع اول حلقه

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، قرار گیری تقویت کننده در حلقه (ربع اول حلقه) امکان تقویت را فراهم می کند. در شکل ۶ مشاهده می شود با چرخاندن محل قرار گیری تقویت کننده به صورت ساعت گرد تقویتی بیش از ۱۵ دسی بل حاصل شده است.



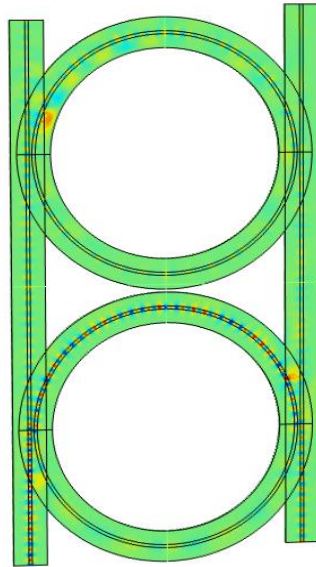
شکل ۶- طیف بهره در حالت چرخش تقویت کننده ۵۵ درجه

از زاویه ی چرخش ۷۵ درجه تا ۳۴۵ درجه، هیچ گونه تقویتی در هیچکدام از پورت ها وجود ندارد. در شکل ۷ طیف بهره نشان داده شده است. اما طیف نشان میدهد که ساختار گزینشی تر نسبت به ساختار بدون تقویت کننده عمل میکند.

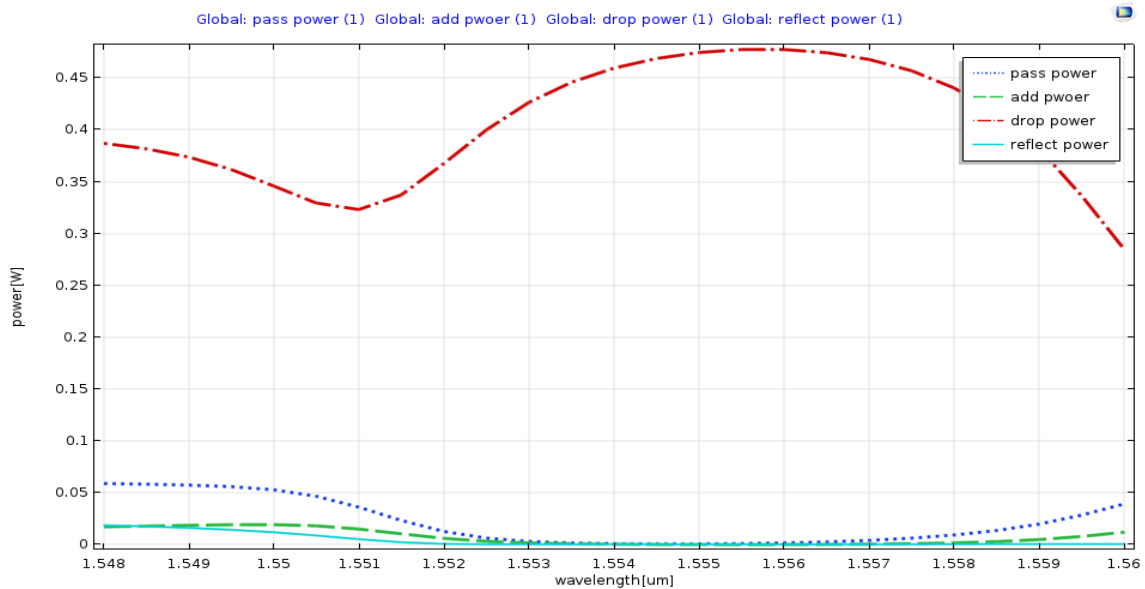


شکل ۷- طیف بهره در زاویه ی چرخش تقویت کننده بین ۷۵ تا ۳۴۵ درجه

در شکل ۸ و ۹ توزیع میدان الکتریکی و طیف بهره دو حلقه‌ای موازی نشان داده شده است. وقتی که ساختار به دو حلقه‌ای موازی تبدیل می‌شود، طیف بهره در پورت دراپ بیشتر از تک حلقه‌ای و صاف تر می‌شود

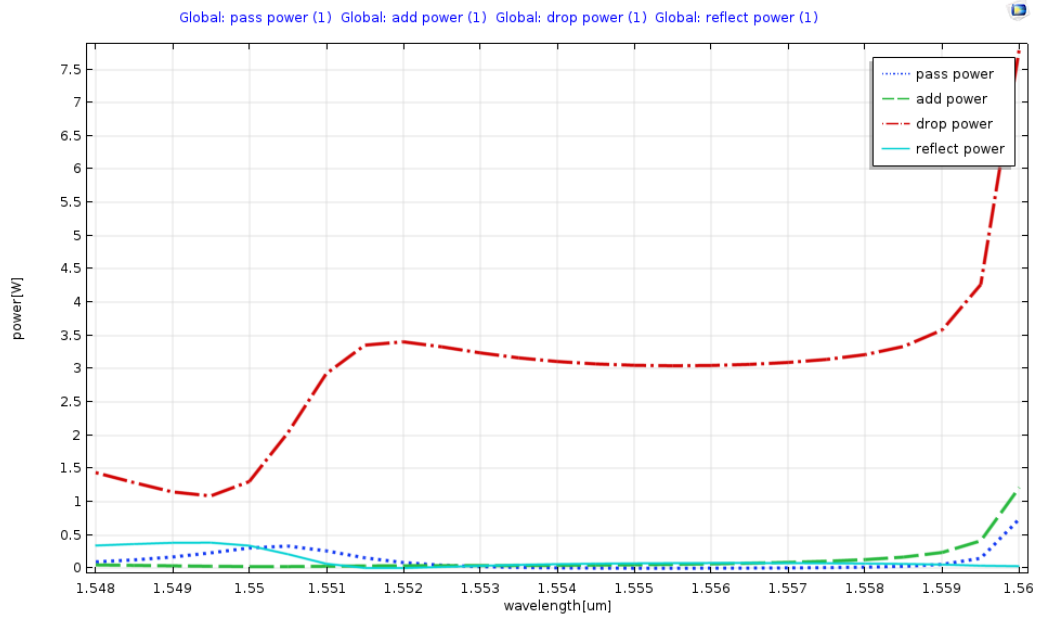


شکل ۸- توزیع میدان الکتریکی در دو حلقه‌ای موازی



شکل ۹- طیف بهره دو حلقه‌ای موازی

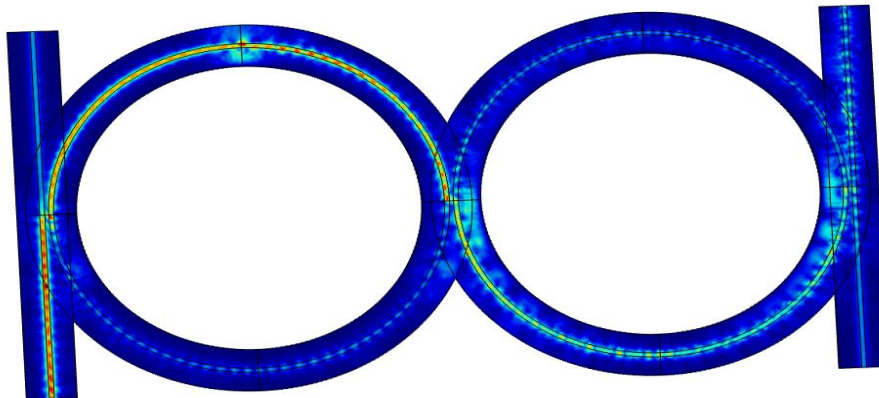
در این قسمت از ساختار موازی دو حلقه‌ای استفاده شده است که در هر دو حلقه یک چهارم آن تقویت کننده قرار دارد. طیف های بهره متفاوتی در این ساختار بدست آمده استدر شکل ۱۰ و ۲۱ طیف بهره نشان داده شده است.



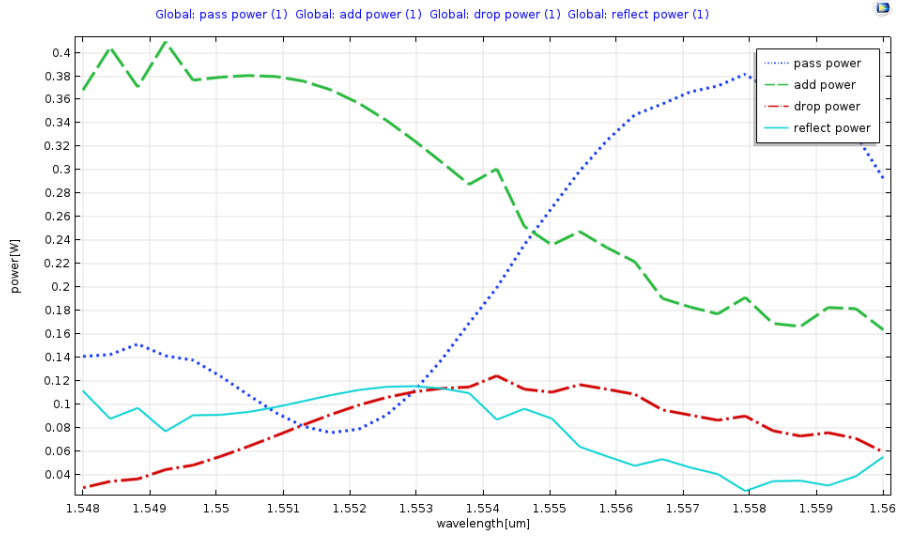
شکل ۱۰- طیف بهره در چرخش ۵ درجه چرخشی تقویت کننده در دو حلقه ای موازی

در این ساختار نیز از زاویه چرخشی مشخصی به بعد، سیگنال در هیچ پورتهای تقویت نمی شود. این زاویه، زاویه ۱۱۰ درجه تا ۳۵۵ درجه است.

ساختار دو حلقه ای سری، طیف بهره و توزیع میدان الکتریکی در شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. وقتی سیگنال به حلقه ی اول تزویج میشود، ماکزیمم توان در دو ربع بالای حلقه ی اول تزویج می شود. سیگنال در مکانی که دو حلقه اشتراک دارند به حلقه ی دوم تزویج می شود. سیگنال در ادامه مسیر به دو ربع پایینی انتشار پیدا میکند. سیگنالی که در دو ربع پایینی انتشار پیدا کرده در ادامه مسیر به موجبر تزویج میشود. ماکزیمم سیگنال از پورت اد عبور می کند.

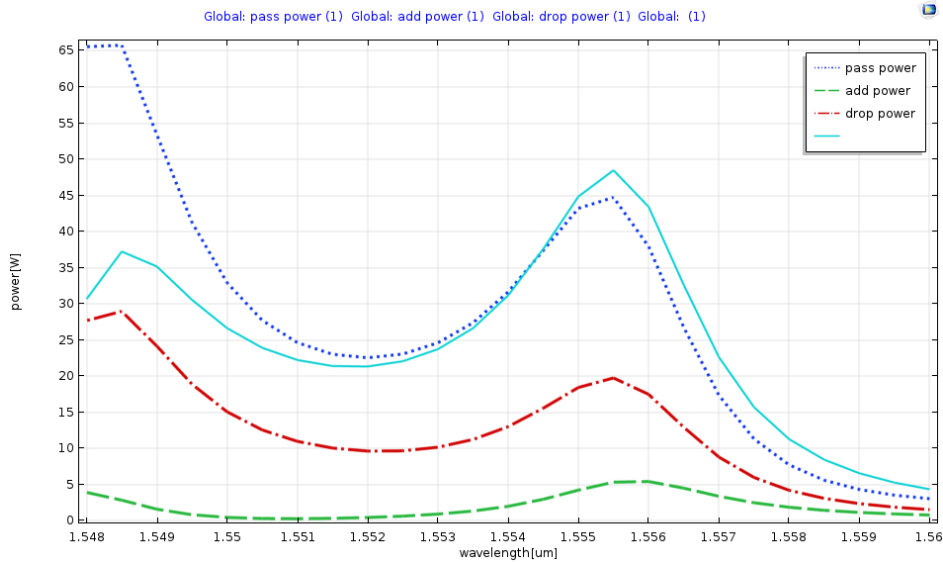


شکل ۱۱- توزیع میدان الکتریکی در دو حلقه ای سری



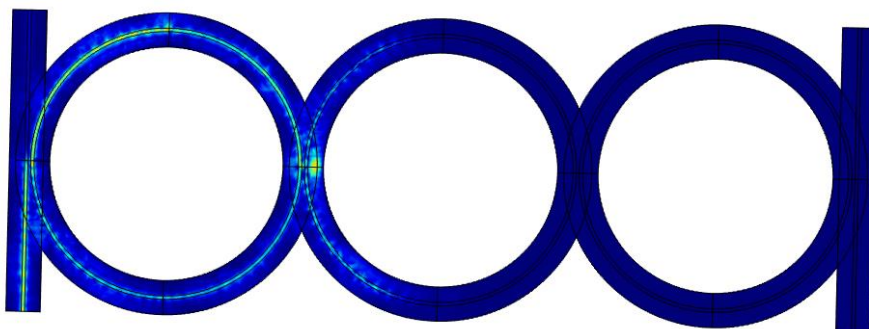
شکل ۱۲- طیف بهره برای ساختار دو حلقه‌ای سری

در ساختار دو حلقه‌ای سری با قرار دادن تقویت کننده در حلقه‌ی اول ربع ۴ و در حلقه‌ی دوم در ربع ۳ و ۲ تقویت بسیار خوبی حاصل شده است که نسبت به تک حلقه‌ای و دو حلقه‌ای موازی بسیار بهتر و گزینشی تر است. که در شکل ۱۳ طیف به خوبی نشان میدهد.

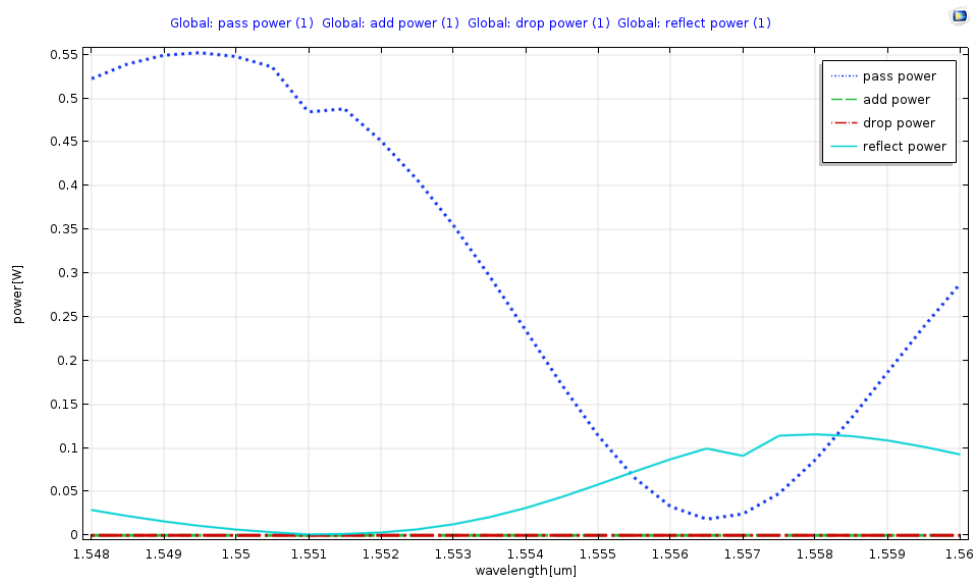


شکل ۱۳- طیف بهره دو حلقه ای سری با تقویت کننده

در ساختار سه حلقه ای که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در حلقه ی دوم میدان در ربع ۱ و ۴ تداخل ویرانگر رخ می دهد، در نتیجه در حلقه ی سوم تزویجی صورت نمی گیرد. بنابراین میدان به پورت اد و دراپ وارد نمی شود. طیف بهره ساختار سه حلقه ای هم اندازه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. هر چقدر طول موج از ۱۵۵۱ بیشتر می شود میزان تزویج به داخل ساختار سه حلقه ای بیشتر می شود. در نتیجه سیگنال بیشتری به داخل حلقه ی اول تزویج می شود.

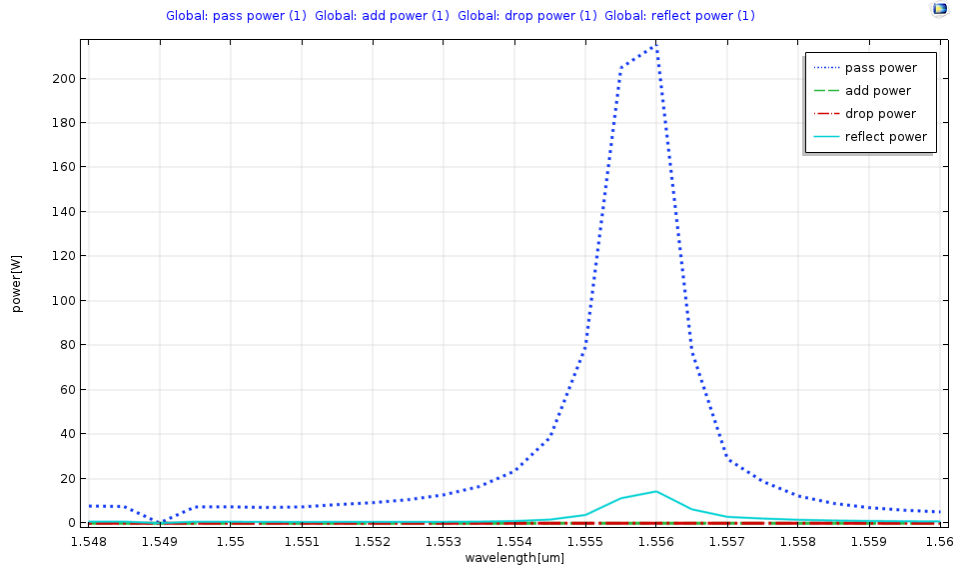


شکل ۱۴- توزیع میدان الکتریکی در سه حلقه ای سری



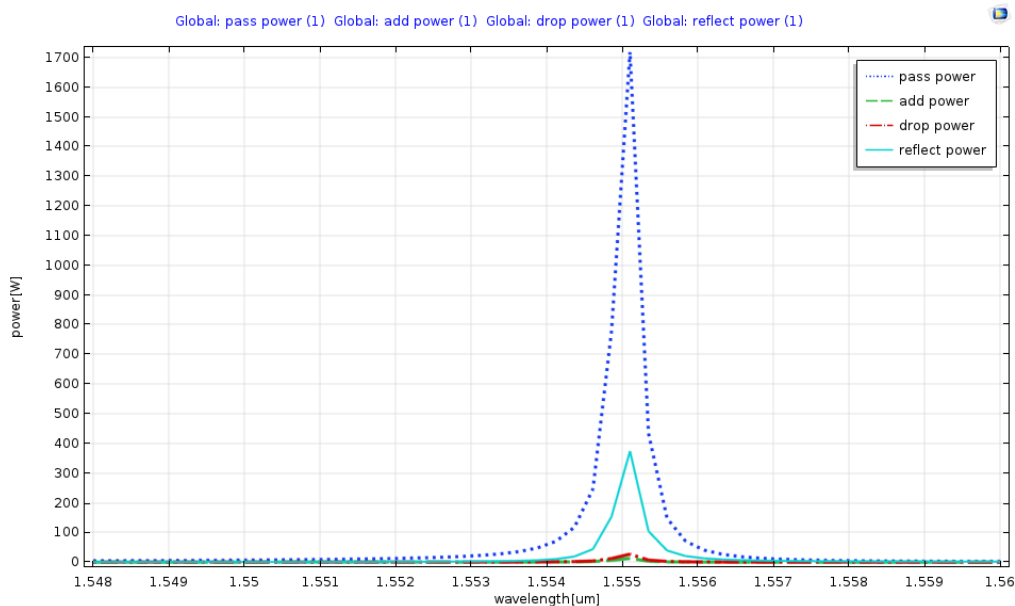
شکل ۱۵- طیف بهره برای سه حلقه ای سری

در ساختار سه حلقه ای سری، تقویت کننده در حلقه ی اول در ربع ۴ و ۱، در حلقه ی دوم در ربع ۲ و ۳ و در حلقه ی سوم در ربع ۲ و ۳ قرار داد. همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شد در طیف طول موج از ۱۵۵۴ نانومتر تا ۱۵۵۷ نانومتر میزان تزویج سیگنال به ساختار سه حلقه ای بیشتر است. هر چقدر تزویج سیگنال به ساختار سه حلقه ای بیشتر باشد تقویت بیشتری حاصل می شود. سیگنال قبل از اینکه حلقه ی اول را دور بزند، تقویت می شود و به حلقه ی دوم سیگنال رونده ای تزویج نمی شود. اما وجود حلقه سوم است که طیف فرکانسی خاصی را برای تزویج بیشتر به حلقه ی اول را به وجود می آورد.



شکل ۱۶- طیف بهره سه حلقه ای سری هم اندازه با تقویت کننده

در هنگامی که نسبت حلقه ها در ساختار به ترتیب ۱، ۰.۹، ۰.۸ می شود طیف بهره تغییرات چشمگیری پیدا می کند و بهره به مقدار ۳۲ دسی بل می رسد. طیف بهره در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با تغییر سایز دادن حلقه ی دوم و سوم طیف فرکانسی که در آن بیشترین تزویج صورت می گیرد، باریکتر می شود. با تغییر دادن اندازه حلقه ی دوم و سوم به ۰.۹ و ۰.۸ سیگنال در هر سه حلقه انتشار پیدا می کند، تقویت شود و به ترتیب سیگنال از حلقه ی سوم به دوم و اول انتشار پیدا می کند. چون در مسیر سیگنال تقویت کننده تقویت کننده وجود دارد سیگنال در هر چرخش به مقدار زیادی تقویت می شود و از پورت عبوری، عبور می کند. در شکل ۱۸ نشان داده شده است که در طول موج ۱۵۵۵ نانومتر تقویت صورت می گیرد که طول موجی است که در آن، ماکزیمم تزویج سیگنال از موجبر به داخل حلقه ها است. در طول موج های دیگر تزویج موثری به ساختار سه حلقه ای صورت نمی گیرد.



شکل ۱۷- طیف بهره سه حلقه ای سری با نسبت ۰.۹، ۱، ۰.۸ با تقویت کننده

۴. نتیجه گیری

در این شبیه سازی ها که انجام شد، اضافه کردن تقویت کننده در همه ی ساختار ها به معنی تقویت کردن نیست. در شکل ۷ مشاهده شد که با اضافه کردن تقویت کننده به قسمت هایی از حلقه هیچ گونه تقویتی رخ نمیدهد و حتی طیف عبوری و تزویج را هم به شدت کاهش میدهد. که اشاره دارد به اینکه قرار دادن تقویت کننده در مسیر های مختلف باعث تغییر مسیر نوری برای فرکانس های تزویج شده است مختلف است. این تغییر مسیرهای نور دلیل اصلی تخریبهای ویرانگر میباشد که باعث میشود سیگنالهای نوری به شدت زیادی از بین بروند پس پیدا کردن مسیر مناسبی برای تقویت مناسب یکی از ضروریات مهم است که باید بررسی شود.

در ساختار های موازی طیف صافتر شده است، که در واقع به این اشاره دارد وقتی نوری وارد پورت ورودی میشود در مسیر اول که حلقه اول قرار دارد تزویج میشود مقدار نوری که وارد پورت ادد میشود و پورت ادد نیز در حلقه دوم نقش بازی میکند که سیگنال های نوری اضافه شده دارای مسیر نوری مشخص میشود که تغییر اساسی در سازندگی و تخریب ایجاد میکند و طیف صافتر را توجیه میکند. دلیل دوم اینکه در واقع طول موجهایی که مقدار کمتری در حلقه اول به دراپ رفتن باقی مانده که به ادد رفتن دوباره وارد محیط حلقه دوم میشوند و به قبلی اضافه میشوند و طیف صافتر میشود.

در ساختار های سری طیف فرکانس گزین تر شد دلیل اصلی آن وجود مسیر نوری جدید است. در واقع اضافه کردن حلقه سری باعث میشود در حلقه دوم پورتهای که باید ادد و دراپ میشد وارد مسیر حلقه میشوند و دوباره با هم تداخل می کنند و

تداخل ها در ماکزیمم حالت ویرانگر است زیاد با مسیر های به یک اندازه و در جهت مخالف تداخل میکنند که تقریباً ۱۸۰ درجه اختلاف فاز پیدا میکنند با انرژی های مختلف و فرکانسهای خاصی را گزینش میکنند که اختلاف انرژی بیشتر و چشمگیر تری دارند . در ساختار در ساختار های سری بدون تقویت کننده تقریباً از حلقه دوم به بعد ساختار تزویج نشده است. دلیل آن، با توجه به توزیع میدان در ساختار سری، تخریب ویرانگر نور و تلفات خمش حلقه اضافه شده در مسیر حلقه بعدی است . اضافه کردن تقویت کننده در این ساختار باعث تغییر شدید در اختلاف انرژی بین نوری که از مسیر تقویت کننده میگذرد و نوری که نمیگذرد می شود پس فرکانس گزینی خیلی بهتری رخ میدهد.

در این تحقیق نشان داده شد که تقویت کننده در حلقه تشدید گر میتواند براساس نیاز، عملکرد آن را بهبود بخشد. در سیستم های خیلی فرکانس گزین میتوان از ساختار سری و در ساختارهایی که نیازمند طیف صافتر است از ساختار های موازی استفاده شود.

۵. منابع و مراجع

- [1] Ashkin, A. and J. Dziedzic, Observation of optical resonances of dielectric spheres by light scattering. *Applied Optics*, 1981.20(10);p.1803-1814
- [2] Hill, S.C., D.H Leach, and R.K Chang, Third order sum frequency generation in droplets; model with numerical results for third-harmonic generation. *JOSA B*, 1993. 10(1):p.16-33
- [3] Haavisto, J. and G.Pajer, Resonance effects in low-loss ring waveguides. *Optics Letters*, 1980. 5(12):p.510-512
- [4] Weiershausen, W. and R. Zengerle, Photonic highway switches based on ring resonators used as frequency-selective component. *Applied Optics*, 1996.35(30):p.5967-5978
- [5] Little, B et al., Microring resonator arrays for VLSI photonics. *Photonics Technology Letters, IEEE* 2000.12(3):p. 32-325
- [6] Weber, H and R. Ulrich. A Thin-Film ring laser. *Applied Physics Letters*. 1971. 19(2):p.38-40
- [7] Ulrich, R and H Weber, Unidirectional thin-film ring laser. *Applied Physics Letters*. 1972.20(1):p. 38-48
- [8] Ulrich, R and H. Weber, Solution-deposited thin films as passive and active light guides. *Applied Optics*, 1972. 11(2): p.428-434.
- [9] Stokes, L.F., M. Chodorow, and H.J Shaw, All-single mode fiber resonator. *Optics Letters*, 1982. 7(6):p.288-290
- [10] Hagness, S., et al. FDTD microcavity simulations :Design and experimental realization of waveguides-coupled single mode ring and whispering-gallery mod disk resonator. *Lightwave technology, Journal of* 1997.15(11):p.2154-2165

- [11] Yupapin, P.P. and N. Pomsuancharoen and S. Chaiyasoonthorn, Attosecond pulse generation using the multistage nonlinear microring resonator. *Microring and Optical Technology Letters*, 2008.50(12):p.3108-3111.
- [12] Yupapin, P.P and N. Pomsuancharoen, Proposed nonlinear microring resonator arrangement for stopping light. *IEEE Photonic technology letters*, 2009.21(6):p.404-406
- [13] Yupapin, P.P and W. Suwanchareon, Entangled photon states generation and regeneration using a nonlinear fiber ring resonator. *Optik*, 2009.120(15):.746-751
- [14] Udomariyasp, P., et al., THz light pulse generations and storage within an embedded optical waveguide system. *Journal of Nonlinear Optical physics and materials*, 2010.19(2):p.303-310
- [15] Mitath, S., R. Putthachareon, and P.P Yupapin, THz band generation for Radio-over fiber system. *Optik*
- [16] Yupapin, P.P and J. Ali. Photonic trapping within a nano-ring resonator controlled by light. *Optik*, 2010.121(21):p.1925-1928
- [17] Aziz, M.S., et al., Gold nanoparticle trapping and delivery for therapeutic applications. *International Journal of Nanomedicine*, 2012.7:p.11-17
- [18] Mitatha, S. et al. Multi-access drug delivery network and stability. *International Journal of Nanomedicine*, 2011.6:p.1757-1764
- [19] Mitatha, S., et al. Proposal for Alzheimer's diagnosis using molecular buffer and bus network. *International Journal of Nanomedicine*, 2011.6:p.1209-1216
- [20] W. Bogaerts et al., "Silicon microring resonators," *Laser Photonics Rev.*, vol. 6, no. 1, pp. 47–73, 2012.

Investigating the optical spectrum of ring micro-resonators by adding an amplifier to the ring

Shahnaz Mohammadi, Ali Pourziad, Saeid Nikmer
Graduate of optical telecommunication engineering,
shahnazmohammadi69@gmail.com

Assistant Professor of Tabriz University, ali_pourziad@tabrizu.ac.ir
Professor of Tabriz University, nikmehr@tabrizu.ac.ir

Abstract— In this article, by using COMSOL Multiphysics software, by adding an amplifier to the structure of ring resonators in an arbitrary size structure of ring that has a frequency line in telecommunication windows, a resonator wavelength of 1555 nm has been achieved. It is strengthened by changing the size of the rings in sequential structures in a resonator array and changing the place of the amplifier in the structure of the rings, an optimal structure has been achieved, which has reached an amplification of about 40 dB. The amplifier that is added to this structure is suggested to be impurity amplifiers, such as doping a part of the ring by erbium atoms or semiconductor amplifiers.

Keyword: ring resonator, amplifier, telecommunication window