



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



## تشدید کننده میکرو حلقه ای توری براگ

امین قادی، سعید میرزانژاد

گروه فیزیک اتمی و ملکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران

چکیده - در این مقاله ویژگی‌های نوع جدیدی از میکرو حلقه‌ها با ضریب شکست متناوب مورد تحقیق قرار گرفته است که آن را توری میکرو حلقه نامیدیم. با استفاده از شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمانی طول موج‌های تشدید، میانگین زمانی توان حمل شده توسط توری میکرو حلقه و افت مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که اثر توری براگ در میکرو حلقه منجر به تقویت شدن انبارش انرژی در یک طول موج تشدید مخابراتی نسبت به دیگر طول موج‌های تشدید دیگر تا حد چند برابر می‌شود. همچنین افت توری میکرو حلقه نیز افزایش می‌یابد. از این اثر می‌توان در طراحی مدارهای مجتمع فوتونیک برای حذف دیگر طول موج‌ها استفاده نمود.

کلید واژه - تفاضل محدود در حوزه زمانی، توری براگ، طول موج تشدید، میکرو حلقه.

## Brag Grating Micro-Ring Resonator

Amin Ghadi, Saeed Mirzanezhad

Atomic and Molecular Physics, Faculty of Basic Science, University of Mazandaran

Abstract- In this paper we investigated characteristics of a new kind of micro-rings with periodic refractive index that we named it grating micro-ring. Resonance wavelengths, average power conveyed with the grating micro-ring and loss are investigated by finite difference time domain method. The results show that the effect of brag grating in the micro-ring cases to intensify the filed enhancement up to some orders of magnitude at one of the telecommunication resonance wavelengths with respect to the other resonance wavelength of the grating micro-ring. Also the loss of grating micro-ring increases too. This effect can be used to design of integrated photonic devices to omit the other wavelengths.

Keywords: Brag Grating, Finite Difference Time Domain, Micro-ring, Resonance Wavelength

۱- مقدمه

میکروحلقه‌های نوری عناصر مفیدی برای فیلتر نمودن طول موج، کلید زدن، مدوله سازی، کاربردهای ترکیب و تفکیک می‌باشند [۱، ۲]. یک میکروحلقه ایده‌آل برای سیستم تفکیک طول موج باید دارای یک گستره طیفی آزاد<sup>۱</sup> و ضریب ظرافت<sup>۲</sup> بزرگ باشد. میکروحلقه‌هایی که بر اساس موجبرها طراحی می‌شوند و در مجاورت موجبرها قرار دارند دارای افت انتشار کمی هستند، اما میزان شفافیت (تمایز) کم ضریب شکست بین محیط هسته و غلاف میکروحلقه منجر به افت حاصل از خمش در ابعاد کوچکتر از یک میلیمتر می‌گردد. برای بدست آوردن فاصله فرکانسی بزرگ بین مدهای میکروحلقه، استفاده از مواد با ضریب شکست بالا در ساخت میکروحلقه‌ها بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد که منتهی به ساخت میکروحلقه‌هایی با افت کم در ابعاد کمتر از یک میلیمتر می‌گردد.

در این مقاله استفاده از توری براگ در میکروحلقه‌ها برای بدست آوردن فاصله فرکانسی بزرگتر بین مدهای تشدیدی پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمانی<sup>۳</sup> انتشار نور در میکروحلقه با ضریب شکست متناوب (توری میکروحلقه) مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند استفاده از توری براگ در میکروحلقه گرچه افت میکروحلقه را افزایش می‌دهد اما در ایجاد فاصله فرکانسی بین مدهای تشدیدی و ایجاد اثر انتخابی در بسامدی خاص موثر است. این ابزار می‌تواند در طراحی کلیدهای نوری مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روابط و شبیه سازی

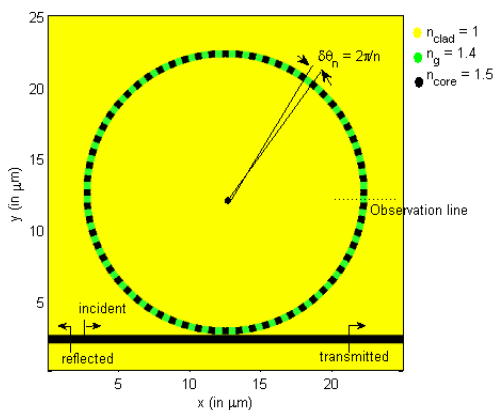
با استفاده از روش شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمانی دو بعدی معادله ماکسول را برای مد TE حل می‌کنیم که دارای مولفه‌های میدانهای مغناطیسی  $H_x$  و  $H_y$  و میدان الکتریکی  $E_z$  است [۳].

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{-1}{\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right], \quad (3)$$

در این جا  $\varepsilon$  تابع دی‌الکتریک محیط و  $\mu_0$  پذیرفتاری مغناطیسی خلا است. با حل عددی معادلات فوق انتشار نور در بسامدهای مختلف بدست می‌آید [۳]. شکل (۱) تصویر توری میکروحلقه را نشان می‌دهد. ضریب شکست نواحی زرد، سبز و سیاه به ترتیب برابر با ۱، ۱٫۴ و ۱٫۵ است. پهنای موجبر، شعاع داخلی و شعاع خارجی میکروحلقه به ترتیب ۰٫۵، ۹٫۵ و ۱۰ میکرومتر است. فاصله گاف بین بدنه میکروحلقه و موجبر در ناحیه کمترین فاصله آنها ۰٫۱ میکرومتر است. موج فرودی از سمت چپ موجبر وارد شده و موج عبوری از سمت راست اندازه‌گیری می‌شود. پهنای زاویه‌ای در نظر گرفته شده برای توری میکروحلقه به ازای  $n=128$  می‌باشد. اندازه‌های در نظر گرفته شده برای عناصر طول و زمان در این شبیه‌سازی عبارتند از  $\Delta x = \Delta y = 0.5 \mu m$  و  $\Delta t = \Delta x / (c \cdot 2.5)$  که  $c$  سرعت نور در خلا است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار Matlab-R2014 صورت گرفته است. برای جلوگیری از انعکاسات پنجره محاسباتی از شرایط مرزی جذب کننده مرتبه دوم [۴] استفاده شده است.



شکل ۱: میکروحلقه با ضریب شکست متناوب (توری میکروحلقه). ضریب شکست نواحی زرد، سبز و سیاه به ترتیب برابر با ۱، ۱٫۴ و ۱٫۵ است. فاصله گاف بین بدنه میکروحلقه و موجبر در ناحیه کمترین فاصله آنها ۰٫۱ میکرومتر است. موج فرودی از سمت چپ موجبر وارد شده و موج عبوری از سمت راست اندازه‌گیری می‌شود. پهنای زاویه‌ای توری میکروحلقه به ازای  $n=128$  می‌باشد.

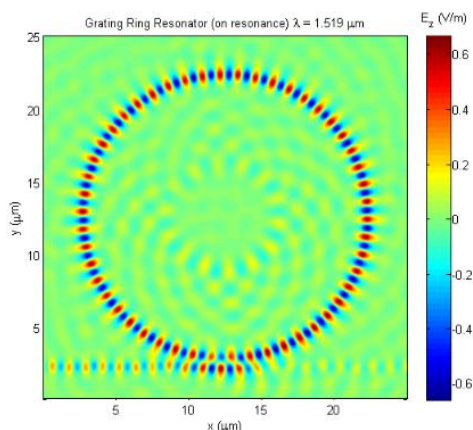
برای بدست آوردن گستره طیفی بسامدهای تشدید توری میکروحلقه از روش تبدیل فوریه ناپیوسته<sup>۴</sup> [۳] استفاده شده است. در این روش موج ورودی را بصورت یک پالس

<sup>۱</sup> Free Spectral Range (FSR)

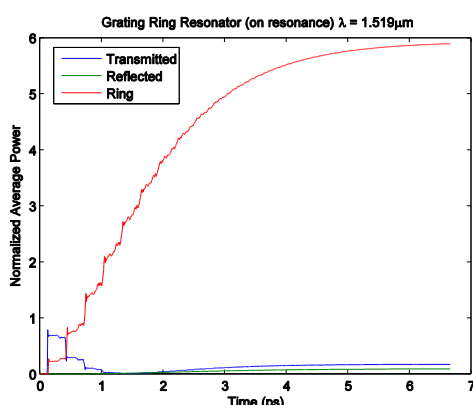
<sup>۲</sup> Finesse

<sup>۳</sup> Finite difference time domain (FDTD)

<sup>۴</sup> Discrete Fourier Transform (DFT)



شکل ۳: شبیه‌سازی انتشار نور در بسامد تشدید توری میکروحلقه.

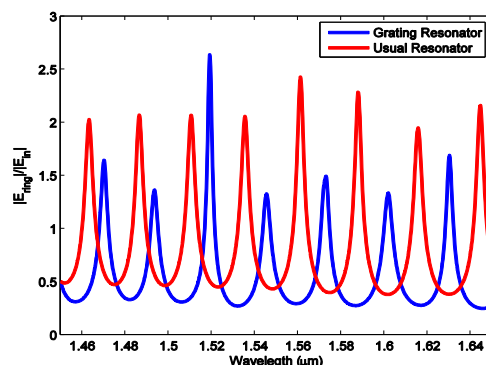


شکل ۴: میانگین زمانی توان بهنجار در توری میکروحلقه در بسامد تشدید.

شکل (۴) میانگین زمانی توان بهنجار شده توری میکروحلقه در طول موج تشدید  $1,519\mu\text{m}$  برای مد مرتبه ۵۰ را با رنگ قرمز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود توان داخل توری میکروحلقه پس از حدود ۶ پیکوثانیه به حالت پایدار می‌رسد که مقدار آن تقریباً شش برابر میانگین زمانی توان ورودی موجبر است. میانگین زمانی توان خروجی موجبر تقریباً ۱۷٪ توان ورودی است که با رنگ آبی ترسیم شده و توان انعکاس یافته از توری میکروحلقه (که در جهت عکس موج ورودی است) تقریباً ۹٪ توان ورودی است که با رنگ آبی ترسیم شده است.

شکل (۵) شبیه‌سازی انتشار نور در توری میکروحلقه در طول موج غیرتشدید  $1,5319\mu\text{m}$  برای مد مرتبه ۵۰ را نشان می‌دهد که همانطور که انتظار می‌رود میزان میدان الکتریکی انتقال یافته به توری میکروحلقه بسیار کم بوده بیشتر میدان فرودی از بخش خروجی موجبر خارج می‌شود.

بسیار کوتاه زمانی در نظر گرفته و با انتشار آن به روش تفاضل محدود در حوزه زمانی و استفاده از تبدیل فوریه گستره طیفی بسامدها یا طول موج‌های تشدید توری میکروحلقه را می‌یابیم.

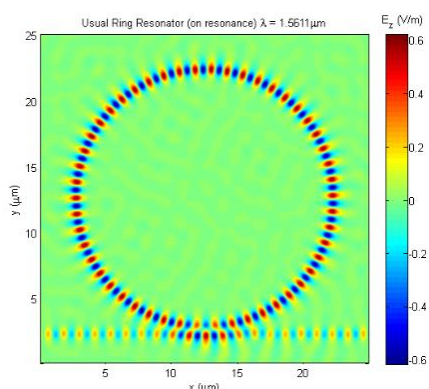


شکل ۲: گستره طیفی توری میکروحلقه با رنگ آبی و گستره طیفی میکروحلقه معمولی (با همان ابعاد توری میکروحلقه و ضریب شکست ۱,۵) با رنگ قرمز نشان داده شده است.

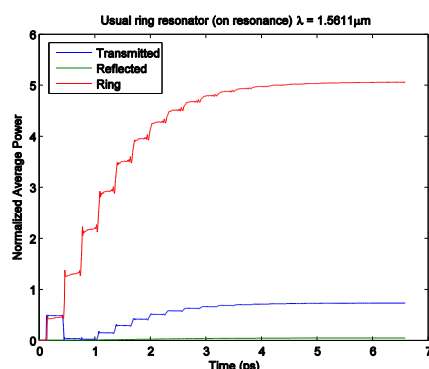
شکل (۲) گستره طیفی توری میکروحلقه را با رنگ قرمز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در طول موج تشدید  $1,519\mu\text{m}$  نسبت میدان الکتریکی میکروحلقه  $2,63$  برابر میدان ورودی است و اندازه میدان در این طول موج تشدید حدود  $1,93$  تا  $1,6$  بزرگتر از دیگر طول موج‌های تشدید است که این در نتیجه اثر توری است. برای مقایسه گستره طیفی میکروحلقه معمولی (با همان ابعاد توری میکروحلقه و ضریب شکست ۱,۵) با رنگ قرمز نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نسبت میدان میکروحلقه به میدان ورودی در طول موج‌های تشدید همگی تقریباً یک اندازه بوده و اختلاف زیادی بین آنها مشاهده نمی‌شود. همچنین فاصله بین طول موج‌های تشدید توری میکروحلقه  $0,0256\mu\text{m}$  که در میکروحلقه عادی به  $0,0257\mu\text{m}$  می‌رسد.

شکل (۳) شبیه‌سازی انتشار نور در طول موج تشدید  $1,519\mu\text{m}$  در توری میکروحلقه برای مد مرتبه ۵۰ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نسبت میدان توری میکروحلقه به میدان ورودی موجبر بسیار بزرگتر است. همچنین بخشی از میدان الکتریکی موج توسط توری میکروحلقه پراکنده و بخشی دیگر در جهت عکس به ورودی منعکس می‌شود که این امر منجر می‌گردد که میزان میدان الکتریکی موج خروجی از موجبر بسیار کمتر از میدان ورودی باشد.

پرداختن به آن خارج از موضوع بحث این مقاله است.



شکل ۷: شبیه سازی انتشار نور در تشدید میکرو حلقه معمولی.



شکل ۸: میانگین زمانی توان بهنجار میکرو حلقه معمولی در تشدید.

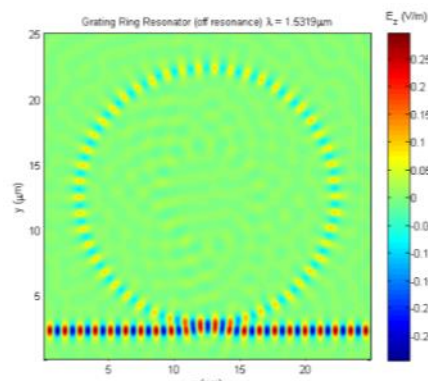
### ۳- نتیجه گیری

توری میکرو حلقه می تواند گستره طیفی طول موج های تشدید میکرو حلقه را بطور موثر تغییر دهد آنطور که نسبت میدان الکتریکی موج انتقال یافته به میکرو حلقه در یکی از طول موج های تشدید در حدود دو برابر دیگر طول موج های تشدید شود که این پدیده با افزایش افت همراه است. از این اثر می توان در طراحی مدارهای مجتمع فوتونیکی جهت حذف دیگر طول موج ها استفاده نمود.

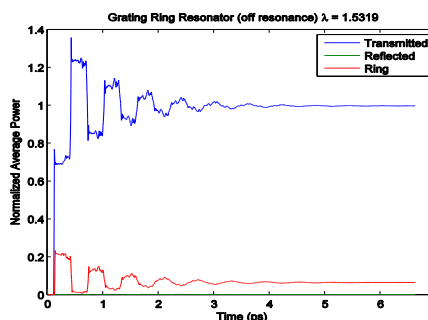
### مراجع

- [1] Kamalakis, T., Alexandropoulos, D., & Vainos, N., *Efficient design of polymer micro-ring resonator filters based on coupled mode theory and finite difference mode solver*, **Optics Communications**, 399(0), (2015) 123-128.
- [2] Kang, Y. M., Arbabi, A., & Goddard, L. L., *A microring resonator with an integrated Bragg grating: a compact replacement for a sampled grating distributed Bragg reflector*, **Optical and quantum electronics**, 41(9), (2009) 689-697.
- [3] Taflove, A., & Hagness, S. C. *Computational Electrodynamics: the FDTD method*. Artech House Boston, London, third ed, 2005.
- [4] Mur, G. *Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations*, **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, (4), (1981) 377-382.

در شکل (۶) میانگین زمانی توان انتقال یافته به توری میکرو حلقه را با رنگ قرمز نشان می دهد که در حالت پایدار خود حدود ۶,۳٪ توان ورودی را در خود دارد. میزان توان انعکاس یافته بسیار ناچیز و میزان توان انتقال یافته از خروجی موجبر تقریباً ۰,۹۸٪ است.



شکل ۵: شبیه سازی انتشار نور در بسامد غیر تشدید توری میکرو حلقه.



شکل ۶: میانگین زمانی توان بهنجار توری میکرو حلقه خارج تشدید.

برای مقایسه عملکرد توری میکرو حلقه با یک میکرو حلقه معمولی با همان ابعاد شکل (۱) و ضریب شکست ۱,۵، شبیه سازی مشابهی در شکل (۷) برای طول موج تشدید  $1,5611 \mu\text{m}$  مد مرتبه ۵۰ نشان داده شده است. در شکل (۸) نیز میانگین زمانی توان بهنجار داخل میکرو حلقه معمولی بر حسب زمان با رنگ قرمز ترسیم شده است که نشان می دهد در حالت پایا حدود ۵ برابر میانگین توان ورودی است. میزان توان خروجی از موجبر نیز با رنگ آبی ترسیم شده است که در حالت پایا حدود ۰,۷۳٪ میانگین توان خروجی است. میزان توان انعکاس یافته نیز بسیار ناچیز (حدود ۰,۴٪) است. با توجه به این نمودار می توان دریافت که میزان توان پراکنده شده توسط میکرو حلقه معمولی ۰,۱۳٪ است که این رقم برای توری میکرو حلقه حدود ۰,۷۳٪ می باشد. یکی از راه های کاهش افت میکرو حلقه بزرگتر انتخاب نمودن پهنای بدنه میکرو حلقه (تفاضل بین شعاع خارجی و داخلی میکرو حلقه) است که